

# Emballage et transport des matériaux organiques en provenance de sites de haute altitude ❄️❄️❄️

❄️❄️❄️ *mesures de conditionnement  
et sécurisation des indices archéologiques*

Mémoire présenté par : Martin Bader

Pour l'obtention du Diplôme  
des Hautes écoles spécialisées de Suisse Occidentale  
Date de restitution : 13 juin 2008

## Remerciements

Les personnes qui ont contribué, de manière directe ou indirecte, à la réalisation de ce mémoire de diplôme sont nombreuses et mériteraient toutes quelques lignes qui leur seraient ici personnellement adressées. J'espère toutefois qu'elles trouveront dans ce simple mot la marque de ma sincère reconnaissance. Merci donc à

mon mentor, Marquita Volken, archéologue et conservatrice-restauratrice, Centre de calcéologie et cuirs ancien *Gentle Craft* à Lausanne,

l'ensemble du personnel de l'*Archäologischer Dienst des Kantons Bern* (ADB) et notamment à

Christoph Rogalla v.Bieberstein, responsable du ressort *Restaurierung und Fundarchive*,  
Sabine Brechbuehl et Johanna Klügl, conservatrices-restauratrices,  
Dr. Renate Ebersbach et Elisabeth Zahnd, co-responsables du ressort *Inventar*,  
Dr. Albert Hafner, responsable du secteur *Feuchtbodengrabungen*,  
Peter Liechti, responsable du *Werkhof*,

de l'*Institut für Prähistorische und Naturwissenschaftliche Archäologie* (IPNA) de l'université de Bâle

Dr. Angela Schlumbaum, biologiste moléculaire,  
Prof. Jörg Schibler, archéozoologue,  
Dr. Christoph Brombacher, archéobotaniste,

Dr. Antoinette Rast-Eicher, archéologue, *Archeotex - Büro für archäologische Textilien* à Ennenda (GL),  
Dr. Kurt W. Alt, anthropobiologiste *Institut für Anthropologie, Universität Mainz*,  
Prof. Eric Crubézy, anthropobiologiste, Laboratoire d'anthropobiologie, CNRS, Université Toulouse III (France),  
Dr. Jorge E. Spangenberg, géochimiste, Institut de Minéralogie et Géochimie de l'université de Lausanne,  
Werner Schoch, dendrologue de l'*Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft* (WSL),  
Birmensdorf (ZH),

de la *Hochschule der Künste Bern* (HKB)

Dr. Caroline Forster, chimiste de la conservation-restauration,  
Ueli Fritz, conservateur-restaurateur,

Dr. Günther Kaufmann, archéologue conservateur, *Museo Archeologico dell'Alto Adige* à Bolzano (Italie),  
Serge Volken, calcéologue, *Gentle Craft*,  
Valery Monahan, conservatrice-restauratrice, *Conservator Museums Unit – Government of Yukon (Canada)*,  
David Cuendet, conservateur-restaurateur, laboratoire de conservation-restauration du Musée d'Archéologie et d'Histoire du canton de Vaud,  
Jean-François Muller et Ulrich K. Salzmann de l'entreprise Carbagas AG à Liebefeld (BE),  
Rolf Suter de l'entreprise *Suter SwissComposite Group* à Jegenstorf (BE),  
Alain Bader et Gil Stauffer,

à la Haute Ecole Arc

Eric Bovet et François Goetz, enseignants,

Aurélié Rogalla v.Bieberstein, Thierry Jacot et Christian Binet, conservateurs-restaurateurs chargés de cours,

Stefanie Bruhin et Vinciane Bruttin, étudiantes-diplômantes en conservation-restauration,

Et à Alexis Domjan, pour avoir permis l'utilisation de  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  pour la rédaction de ce travail,

Et finalement ici,

*un soupir pour "YourMum",*

*une larme pour Pauvre Biscuit,*

*et une prière pour très Ste Heloyse...*

# Table des matières

<b>Résumé – Zusammenfassung – Abstract</b>	<b>8</b>
<b>Introduction</b>	<b>11</b>
<b>1 Contexte général et spécification du projet</b>	<b>13</b>
1.1 Lenk-Schnidejoch (BE) : un site “gelé” dans l’Oberland bernois . . . . .	13
1.1.1 Situation géographique . . . . .	14
1.1.2 Campagnes de fouilles 2004-2007 . . . . .	15
1.1.3 Quelques résultats . . . . .	17
1.1.4 Recherches interdisciplinaires . . . . .	18
1.2 Laboratoire de conservation-restauration . . . . .	18
1.2.1 Position et responsabilités . . . . .	19
1.2.2 Transport et conditionnement . . . . .	19
1.2.3 Traitement des matériaux organiques . . . . .	20
1.2.4 Recherches interdisciplinaires et logistiques . . . . .	20
1.3 Description du projet . . . . .	21
1.3.1 Problématique : le conditionnement <i>in situ</i> et le transport des matériaux organiques issus de la glace . . . . .	21
1.3.2 Méthodologie . . . . .	24
<b>2 Les matériaux organiques dans la glace</b>	<b>28</b>
2.1 L’archéologie dans la glace . . . . .	28
2.1.1 Types de sites . . . . .	28
2.1.2 Réchauffement climatique et préservation des sites . . . . .	31
2.1.3 Prospection, découverte et surveillance des sites . . . . .	32
2.1.4 Méthodes de dégagement . . . . .	33
2.2 Constitution des matériaux organiques – quelques généralités . . . . .	34
2.2.1 Les polysaccharides . . . . .	35
2.2.2 Les protéines . . . . .	35

2.2.3	Les lipides . . . . .	36
2.2.4	Les biominéraux . . . . .	36
2.2.5	Eau et état hydrique . . . . .	37
2.3	La glace comme milieu d'enfouissement – Préservation et dégradation . . . . .	39
2.3.1	De l'eau solide... . . . .	39
2.3.2	Altérations chimiques . . . . .	42
2.3.3	Altérations biologiques . . . . .	44
2.3.4	Synthèse . . . . .	47
2.4	Altérations post enfouissement . . . . .	47
2.4.1	Notes quant à la dynamique des objets dans la glace . . . . .	48
2.4.2	Conditions de découverte . . . . .	48
2.5	Implications pour le conditionnement des artefacts . . . . .	49
	Conservation <i>in situ</i> (i) : objectif général . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Etudes et analyses scientifiques – mesures de sécurisation des indices</b>	<b>52</b>
3.1	Un col alpin comme contexte archéologique . . . . .	53
3.1.1	Datation isotopique <sup>14</sup> C/AMS . . . . .	54
3.2	Une jambière de pantalon néolithique . . . . .	55
3.2.1	Première phase : le nettoyage d'investigation . . . . .	55
3.2.2	Fibres végétales et animales . . . . .	56
3.2.3	Les pollens . . . . .	58
3.2.4	Analyse des lipides . . . . .	59
3.2.5	Analyse de l'ADN ancien . . . . .	60
3.3	Synthèse . . . . .	62
	Conservation <i>in situ</i> (ii) : mesures de sécurisation des indices . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Emballage et protection des artefacts</b>	<b>65</b>
4.1	Objectif général : le maintien du <i>statu quo</i> . . . . .	65
4.1.1	Types d'artefacts . . . . .	66
4.1.2	Scénarii de découverte . . . . .	67

4.1.3	Maintien de l'hygrométrie . . . . .	68
4.2	Sélection des matériaux d'emballage et de protection . . . . .	70
4.2.1	Quelques critères . . . . .	71
4.2.2	Matériaux retenus . . . . .	72
4.2.3	Contrôle de certains matériaux . . . . .	74
4.3	Options d'emballage . . . . .	75
4.3.1	La solution Minigrip® . . . . .	75
	Conservation <i>in situ</i> (iii) : emballage et support pour artefacts plats / fragiles . . . . .	77
4.3.2	Le trio Tyvek® / Dermotekt® / film PELD . . . . .	78
	Conservation <i>in situ</i> (iv) : maintien de l'hygrométrie . . . . .	79
4.3.3	Protection externe des artefacts longs / volumineux . . . . .	80
	Conservation <i>in situ</i> (v) : réalisation d'une protection externe . . . . .	82
4.3.4	Documentation . . . . .	82
4.3.5	Et pour une momie ? . . . . .	83
4.4	Synthèse . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Stockage in situ et transport</b>	<b>84</b>
5.1	Transferts thermiques : quelques notions de base . . . . .	84
5.1.1	Conduction . . . . .	85
5.1.2	Convection . . . . .	86
5.1.3	Rayonnement . . . . .	86
5.2	Un caisson isotherme : concept & réalisation . . . . .	87
5.2.1	Dimensions . . . . .	88
5.2.2	Choix des matériaux . . . . .	89
5.2.3	Réalisation . . . . .	93
5.3	Tests, usage et modules complémentaires . . . . .	96
5.3.1	Efficacité . . . . .	96
5.3.2	<i>Cushioning</i> interne . . . . .	97
5.3.3	Systèmes d'apport de froid . . . . .	99

5.4	Bilan thermique . . . . .	103
	Conservation <i>in situ</i> (vi) : maintien de basses températures . . . . .	106
5.5	Bilan pondéral . . . . .	107
<b>Discussion</b>		<b>109</b>
<b>Conclusion</b>		<b>111</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>121</b>
<b>Liste des Figures</b>		<b>123</b>

## Résumé

Suite au réchauffement climatique des ces dernières années, de nombreux artefacts archéologiques d'époques historiques et préhistoriques ont été libérés d'un banc de glace sur le col alpin du Schnidejoch (BE). Depuis 2004, le service archéologique du canton de Berne (ADB) surveille la fonte de la glace pour y mener l'étude de ce contexte archéologique inhabituel. Confronté à une situation nouvelle, le laboratoire de conservation-restauration de l'ADB a initié un programme de recherches sur le dégagement (travail de diplôme de Charlotte Rerolle<sup>1</sup>), et le conditionnement, sur le site et pour le transport, du mobilier archéologique en matériaux organiques, sujet du présent travail. L'aspect du transport est particulier en cela que le site est éloigné de plusieurs heures de marche du dernier point où peuvent accéder les véhicules : la problématique est celle d'une randonnée alpine.

Ce travail de diplôme cherche à répondre à deux impératifs principaux qui sont : (i) un conditionnement adéquat et la protection physique des artefacts ; (ii) la sécurisation des indices archéologiques. Le premier point relève de la conservation préventive. Le conditionnement implique la compréhension du milieu d'enfouissement qu'est la glace, les mécanismes de dégradation en jeu et les conséquences de la "mise au jour" (laquelle est, pour un banc de glace, à distinguer de la découverte). Un aspect important est la sécurisation des indices archéologiques : les objets issus d'un tel contexte sont rares et souvent en excellent état de préservation, ce qui offre l'opportunité d'entreprendre toute une gamme d'analyses scientifiques. Certaines de ces études nécessitent toutefois que des mesures particulières soient respectées dès la découverte, pour la manipulation et l'emballage d'un artefact. Ces mesures ont été discutées avec les collaborateurs scientifiques de l'ADB et font l'objet de la 3<sup>e</sup> partie de ce document.

Plusieurs options complémentaires d'emballage, de soutien et de protection ont été développées, selon des *scenarii* de découverte et pour des artefacts de différents formats. Les solutions envisagées visent fondamentalement au maintien de l'état de découverte, à la prévention du développement de micro-organismes, et à la protection physique des artefacts. Pour répondre à ces objectifs, divers matériaux ont été sélectionnés ; les critères de choix, tests d'évaluation et options d'application sont présentées dans la 4<sup>e</sup> partie de ce mémoire.

Pour le conditionnement, un prototype de caisson isotherme avec une âme en polystyrène expansé renforcée par des coques en fibre de verre a été réalisé (5<sup>e</sup> partie). Un système de *cushioning* (ou calage / contention interne) adaptable permet de stabiliser les artefacts au cours du transport. Par l'ajout de sachets de neige / glace, le caisson permet le maintien de températures comprises entre 1 et 4°C pour la durée du trajet de retour du site. Un second couvercle, auquel est intégré un module de refroidissement électrique (éléments peltier), offre une solution d'appoint pour la phase motorisée du transport jusqu'au laboratoire.

Au final, l'équipement développé pour le projet est préparé et fixé sur des *Lastenkraxe*®, armatures de sac à dos qui permettent l'acheminement de l'ensemble du matériel sur le site. Les principaux résultats de mes recherches se retrouvent synthétisés dans des encadrés grisés nommés "conditionnement *in situ* (i-vi)" aux pages 51 ; 64 ; 77 ; 79 ; 82 et 106 du présent document.

---

<sup>1</sup>Etudiante en *Master de conservation-restauration de biens culturels* à l'université Paris I – Panthéon Sorbonne.



## Zusammenfassung

Die Klimaerwärmung der letzten Jahre hat auf einem Eisfeld des Schnidejochpasses in den Berner Alpen zahlreiche archäologische Gegenstände aus historischer und prähistorischer Zeit freigelegt. Der Schmelzvorgang wird seit 2004 vom Archäologischen Dienst des Kantons Bern (ADB) überwacht. Im Zusammenhang mit der Untersuchung des ungewöhnlichen archäologischen Umfelds lancierte das Restaurierungslabor des ABD ein Forschungsprogramm, um die Freilegungsmethoden (Diplomarbeit von Charlotte Rerolle<sup>2</sup>), die Aufbewahrung *in situ* wie auch den Abtransport der organischen Funde aus dem Eis zu untersuchen. Die vorliegende Diplomarbeit geht nun der Frage der passenden Verpackung der Funde sowie der Sicherung der archäologischen Indizien nach. Ein spezielles Problem stellt dabei auch der Transport dar, da das besagte Eisfeld vom letzten Parkplatz aus nur in einem mehrstündigen Fussmarsch erreichbar ist.

Bei der Wahl der richtigen Verpackung ist das Verständnis des natürlichen Umfelds der Fundstelle ebenso von Bedeutung wie jenes über das Zersetzungsverhalten der Funde. Was die Sicherung der archäologischen Indizien betrifft, so hat sich gezeigt, dass die in einem solchen Umfeld gefundenen Objekte zwar seltener, aber meist in einem sehr guten Zustand sind. Dies ermöglicht eine ganze Reihe wissenschaftlicher Analysen. Einmal entdeckt, sind zugleich oft Sofortmassnahmen bei der Behandlung und Verpackung der Artefakte notwendig. Diese Massnahmen habe ich im Rahmen meiner Arbeit mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern des ADB diskutiert. Der dritte Teil der Diplomarbeit befasst sich mit diesem Aspekt.

Zur Verpackung und zum Schutz von archäologischen Funden sind verschiedene Methoden mit verschiedenen Materialien entwickelt worden, mit dem Ziel, die Artefakte zu erhalten und vor einer Schädigung durch Mikroorganismen zu schützen. Mit den Auswahlkriterien, Tests und Anwendungsmöglichkeiten befasst sich der vierte Teil der Arbeit.

Zur Verpackung der Funde haben wir eine isotherme Kiste mit Polystyrolschaumstoff gebaut. Der Prototyp ist innen mit Glasfaserschalen verstärkt (5. Teil). Mit einem anpassbaren "Cushioning-System" werden die Artefakte während des Transports stabilisiert. Die Beigabe von Eis- oder Schneebeuteln erlaubt es, die Temperatur in der Kiste beim Abtransport vom Eisfeld auf einer Temperatur zwischen einem und vier Grad Celsius zu halten. Ein zweiter Kastendeckel mit einem integrierten elektrischen Kühlsystem (Peltierkühler) stellt eine weitere Lösung für den gekühlten Transport ins Labor dar. Zum Tragen wird der Kasten auf einen Rucksackrahmen, eine so genannte Lastenkraxe, gestellt. Die wichtigsten Resultate meiner Forschungsarbeit sind in grau hinterlegten Textkästchen auf Seiten 51 ; 64 ; 77 ; 79 ; 82 und 106 zusammengefasst.

---

<sup>2</sup>Etudiante en Master de conservation-restauration de biens culturels à l'université Paris I - Panthéon Sorbonne.

## Abstract

Following latest past years' climate warming, numerous prehistoric and historic archaeological artefacts have been released from an ice field at the Alpine pass Schnidejochpass (BE). Since 2004, the Archaeological Service of Canton Berne (ADB) has been monitoring ice melting in order to study this unusual archaeological site. Faced with a new situation, the Conservation Laboratory of the ADB has initiated a research program on digging-out techniques (diploma research work by Charlotte Rerolle<sup>3</sup>) and, subject of present study, on-site packaging for transport of archaeological organic artefacts released from ice. Transport problems are specific here as the site is located several hours' walk away, in Alpine terrain, from the nearest point accessible by car. Present work intends to meet two main requirements : (1) suitable packaging and physical protection of the artefacts ; (2) safeguarding of archaeological evidences. First point relates to preventive conservation. Packaging implies the understanding of ice as a burial environment, of degradation mechanisms and of consequences of bringing the artefacts out to the air. An important aspect is the safeguarding of archaeological evidences. Objects found in an ice field are rare and often in an excellent state of conservation, thus offering the opportunity for a large range of scientific analyses. Some of these analyses, from the very moment of artefact discovery, demand specific on-site handling and wrapping measures. These measures have been discussed with scientific collaborators of the ADB and are main subject of the third part of present document.

Several complementary options for wrapping and protection have been developed, according to various discovery circumstances and artefact sizes. Proposed solutions are essentially aiming at maintaining the state of objects at the moment of discovery, to prevent microbial propagation and physically protect artefacts. To reach these goals, different materials have been selected. Choice criteria, evaluation tests and application options are presented in the fourth part of this document.

Regarding packaging, a prototype of isothermal container has been built, made of an expanded polystyrene core reinforced with fiberglass shells (5<sup>th</sup> part). An adaptable cushioning system stabilizes artefacts during transport. Bags of ice or snow maintain temperature between 1 and 4 °C in container for the duration of return walk. A second cap equipped with electrical cooling device (Peltier cooler) is a support solution for the motorized part of transport to laboratory.

Designed container is finally mounted and fastened on Lastenkraxe<sup>®</sup>, a rucksack frame also used for transport of all the material to site. Main results of my research are described in grey boxes entitled "Conditionnement *in situ* (i-vi)", pages 51 ; 64 ; 77 ; 79 ; 82 and 106 of present document.

---

<sup>3</sup>Etudiante en Master de conservation-restauration de biens culturels à l'université Paris I - Panthéon Sorbonne.

## Introduction

En diverses régions du globe, les banquises s'amenuisent et se fractionnent ; les glaciers se rétractent ; le permafrost se "dépergélise", de continu devient discontinu, de discontinu sporadique... C'est aujourd'hui un état de fait : notre planète se réchauffe, et l'homme en est "vraisemblablement" responsable.

En conséquence directe resurgissent ça et là des vestiges archéologiques, autrefois perdus, abandonnés ou enfouis d'une manière ou d'une autre dans la neige ou la glace. Après un séjour pouvant s'étendre sur plusieurs millénaires, leur redécouverte revêt un caractère sensationnel, ce d'autant plus que la glace s'avère propice à la préservation de matériaux dits "périssables", qui n'auraient pas survécu dans la plupart des autres milieux d'enfouissement. La découverte en 1991 d'Ötzi, l'homme des glaces, sur le col de l'Hauslabjoch dans le Tyrol italien en constitue l'exemple le plus connu, mais il n'est pas le seul : ces dernières années, des bancs de glace (ou "*ice patches*") du Yukon, d'Alaska et de Norvège ont libéré de nombreux objets archéologiques ; plus près de chez nous, c'est la fonte d'un banc de glace sur le col alpin du Schnidejoch (BE) qui, depuis 2003, a permis la découverte d'un riche mobilier archéologique, en partie composé de matériaux organiques.

L'archéologie de la glace ou des sols gelés est donc un thème d'actualité. Elle pourrait bientôt faire partie de l'histoire de la discipline dès que la fonte ou le dégel aura atteint les "couches" qui contiennent aujourd'hui encore des traces d'activités humaines ; ce en quoi les projections climatologiques ne sont pas spécialement encourageantes.

C'est dans ce contexte que j'ai choisi d'effectuer mon travail de fin d'études, choix que l'on pourra volontiers qualifier d'opportuniste : il l'est en partie. Pour mon mémoire de diplôme, j'envisageais deux domaines ou thèmes généraux :

- (i) Le traitement de matériaux organiques "peu dégradés" tels que ceux issus de la glace ;
- (ii) Une problématique de conservation *in situ*.

Une de mes motivations repose sur l'idée que je me fais de mon futur travail de conservateur-restaurateur : j'envisage une première phase de missions de terrain, plus particulièrement sur des sites archéologiques en milieux dits "extrêmes", dans des zones arctiques ou subarctiques, missions que je considère comme un défi intéressant au niveau de la préparation, mise en place et gestion d'un "laboratoire de fortune", avec la part d'imprévu et improvisation que comportent de telles entreprises ; défi que je souhaiterais, à terme, être à même de relever. Le sujet de mon mémoire devait ainsi aborder l'un ou l'autre des aspects précités.

La problématique particulière d'emballage et stockage *in situ* sur des sites arctiques me paraissait toutefois être déjà suffisamment "exploitée" au travers de publications telles que le *Conservation Manual for Northern Archaeologists* (Scott et Grant, 2006) ; cependant les contraintes spécifiques liées à un site d'altitude diffèrent sensiblement de celles des sites arctiques. A ce stade de réflexion, j'ai toutefois recherché un sujet alternatif : des contacts entretenus avec divers spécialistes<sup>4</sup> m'ont permis de cerner une problématique intéressante autour d'un séchage contrôlé ou

---

<sup>4</sup>Valéry Monahan, conservatrice-restauratrice au *Conservator Museums Unit – Government of Yukon (Canada)* et Christian Binet, professeur chargé de cours à la HEAA Arc notamment, dont les conseils et commentaires m'ont été, à cette étape de réflexion, d'une précieuse aide.

d'une lyophilisation naturelle, possibles à mettre en oeuvre sur des matériaux peu dégradés, traitements "légers" qui offrent l'avantage décisif de ne pas compromettre de futures analyses scientifiques.

C'est avec cette idée que j'ai alors contacté le laboratoire de conservation-restauration du Service Archéologique du Canton de Berne. Pourtant, sous l'impulsion et les propositions enthousiasmantes de Christoph Rogalla v.Bieberstein, mon travail va s'orienter vers mon idée initiale. Au lieu de concerner les traitements de laboratoire, il va se tourner vers les opérations préliminaires de terrain : il s'agit des mesures post-excavation d'emballage, de stockage et de transport entre le site et le laboratoire des matériaux organiques issus de la glace. Soit, c'est entendu !

Le présent travail pourrait s'adresser aux conservateurs-restaurateurs qui participeraient à une mission archéologique sur un site d'altitude et auraient alors à s'occuper du stockage et conditionnement des artefacts en matériaux organiques, en espérant que ceux-ci trouvent parmi les solutions présentées ici des alternatives / options applicables à leurs projets. Afin de ne pas limiter la problématique au seul site du Schnidejoch, je considère tout au long de ce document l'éventualité de la découverte d'un nouveau contexte archéologique d'altitude, "similaire" à celui de Schnidejoch, au travers de l'hypothèse suivante :

*Un groupe de randonneurs. L'un d'eux s'éloigne quelque peu du sentier pour aller observer, dans une légère dépression du versant nord du col du "Nochnichtbekanntjoch", les reliquats d'une plaque de glace. Pourquoi le nier, ayant connaissance du site du Schnidejoch, il espère secrètement réaliser une quelconque trouvaille. Or, il découvre effectivement en bordure de la neige une concentration anormale de fragments de bois, à près de 3000 mètres d'altitude ! Que fait-il ? Rien, si ce n'est de composer sur son portable le numéro des renseignements qui le redirige vers celui du service archéologique cantonal.*

# 1 Contexte général et spécification du projet

Ce travail de diplôme s'inscrit dans un programme de recherche sur le dégagement, le conditionnement et le transport des artefacts<sup>5</sup> organiques issus de la glace, initié par le laboratoire de conservation-restauration du service archéologique du canton de Berne. La mise en place de ce programme de recherche découle de la découverte en 2003, d'artefacts archéologiques jusqu'alors prisonniers de la glace sur un col alpin reliant les cantons de Berne et du Valais.

Avant de développer le sujet du présent travail, je souhaite introduire brièvement le site archéologique Lenk-Schnidejoch, le cadre général de mon stage de diplôme, ainsi que la problématique générale soulevée par la découverte du site du point de vue de la conservation-restauration.

## 1.1 Lenk-Schnidejoch (BE) : un site “gelé” dans l'Oberland bernois

En septembre 2003, suite aux records de températures atteints durant l'été, des randonneurs découvrent des objets sur le col du Schnidejoch. Réalisant le caractère peu commun d'un objet en écorce de bouleau [FIG. 1], ils décident de le remettre au Musée d'Histoire Naturelle de Berne qui le transmet au service archéologique du canton de Berne (abrégé ADB, pour *Archäologischer Dienst des Kantons Bern*, dans la suite du texte). La fonte du banc de glace a par la suite livré un abondant matériel archéologique pré- et protohistorique ainsi que d'époque médiévale. Les découvertes sensationnelles effectuées témoignent de la fréquentation dès le Néolithique final de ce col alpin<sup>6</sup>.



FIG. 1 – Partie d'un carquois néolithique ; écorce de bouleau et cuir (2003).

Depuis 2004, l'ADB suit de près l'évolution de ce banc de glace : il s'agit d'un contexte archéologique particulier où, après des campagnes 2004-2005 riches en découvertes, les archéologues attendent aujourd'hui que la fonte se poursuive et que la glace “libère”, peut-être, de nouveaux artefacts. Une autre caractéristique du site est son éloignement : le col du Schnidejoch se trouve à plus de trois heures de marche du dernier point où peuvent accéder les véhicules et ne peut être rejoint qu'en empruntant des sentiers pédestres.

<sup>5</sup>Dans ce document, l'anglicisme *artefact* est employé comme terme générique. Un artefact (archéologique) englobe tout vestige matériel issu de l'activité humaine, fabriqué, utilisé ou transporté par les hommes. (Jockey, 1999, p.372 ; British Archaeological Job Resource, 2004 ; et Plumet, 2002).

<sup>6</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.49 et Suter *et al.*, 2005b, p.16.

### 1.1.1 Situation géographique

Le Schnidejoch est un col alpin de l'Oberland bernois qui culmine à 2756 m et qui relie la vallée du Rhône à la région de Thoun par le Simmental [FIG. 2]. Le site archéologique proprement dit se situe dans une dépression naturelle du versant nord du col, quelques dizaines de mètres en contrebas de ce dernier. C'est avant tout la topographie particulière des lieux, présentant une très légère pente sous forme de dépression orientée au Nord et donc peu exposée, qui a permis la préservation des matériaux organiques, protégés par la glace qui recouvrait jusqu'alors les lieux [FIG. 3 & 4]<sup>7</sup>.

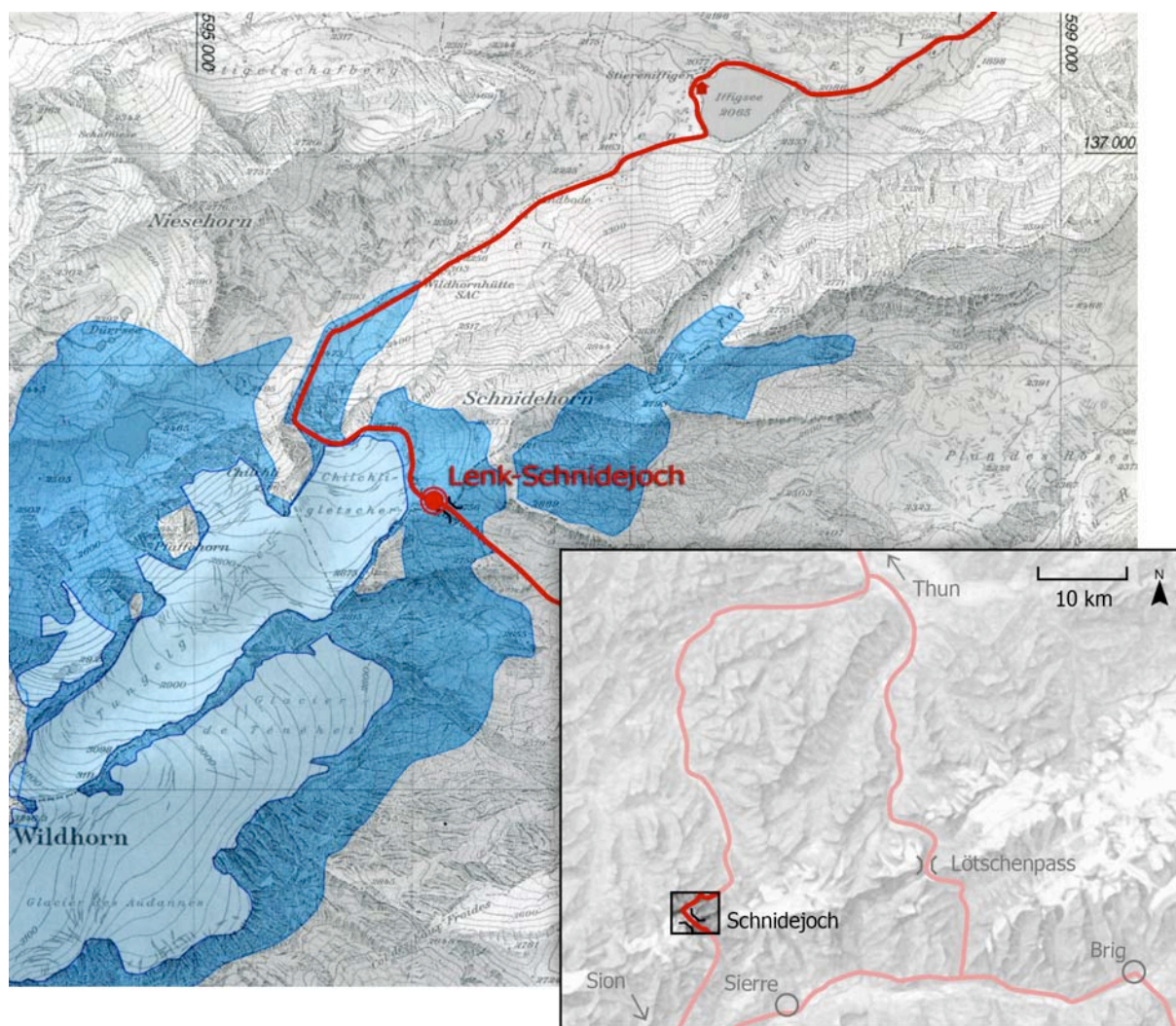


FIG. 2 – Situation géographique du site Lenk-Schnidejoch et itinéraires préhistoriques et d'époque romaine présumés. En bleu, étendue des glaciers d'après la carte Siegfried de 1872 (relevé du secteur dans les années 1840); en bleu clair : étendue actuelle.

<sup>7</sup>Suter et al., 2005a, p.505 et Grosjean et al., 2007, p.206.





FIG. 3 – *Lenk-Schnidejoch 2004* – Le col du Schnidejoch avec, en contrebas, le banc de glace. Le rocher entouré en rouge constitue un point de repère qui se retrouve sur la FIG. 4. Prise de vue direction sud-ouest.



FIG. 4 – *Lenk-Schnidejoch 2007* – Vue du site avec, en arrière plan, le Tüngelgletscher / Chilchligletscher. En 2007, la neige accumulée durant l'hiver précédent n'a jamais fondu totalement. Prise de vue direction ouest.

### 1.1.2 Campagnes de fouilles 2004-2007

Les campagnes de fouilles menées par l'ADB au cours des automnes 2004 et 2005 ont livré un grand nombre d'artefacts appartenant à des époques historiques et préhistoriques distinctes, du Néolithique récent au 15<sup>e</sup> siècle de notre ère. Parmi les quelques 400 pièces en matériaux organiques découvertes sur le site on dénombre : une soixantaine de restes osseux (bovin ; capriné ; cochon ; renard roux ; lapin) ; plus de 200 restes ligneux, parfois issus d'un même objet et qui, à ces altitudes, peuvent tous être considérés comme des artefacts ; deux fragments de textiles (laine et liber) ; et une trentaine de fragments de cuir, de fourrure ou de peau<sup>8</sup>.

Les paragraphes suivants donnent un bref aperçu de la variété des découvertes réalisées. Une description plus détaillée des artefacts ainsi que les premiers résultats des investigations archéologiques se retrouvent dans le tiré à part de l'ADB, *Lenk-Schnidejoch. Funde aus dem Eis – ein vor- und frühgeschichtlicher Passübergang*, paru en 2005.

Les époques médiévales ne sont représentées que par deux fragments de cuir : le premier s'est révélé être un morceau de cuir de ressemelage daté typologiquement entre le 14<sup>e</sup> et 15<sup>e</sup> siècle ; une datation <sup>14</sup>C réalisée sur le second fait remonter celui-ci au 8–9<sup>e</sup> siècle<sup>9</sup>.

<sup>8</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.506-513.

<sup>9</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.511;516.



FIG. 5 – *Fragment de textile d'une ceinture de tunique romaine (2004).*

De nombreux clous de chaussures romains attestent que le col a constitué un lieu de passage privilégié au cours des trois premiers siècles de notre ère. Les archéologues ont prélevé plusieurs autres artefacts datés de la même période, parmi lesquels : un fragment de textile en laine de mouton provenant probablement d'une ceinture de tunique romaine [FIG. 5] ; une fibule en argent ; un fragment de cuir d'une chaussure. Par ailleurs, les vestiges d'une *mansio* – soit d'une auberge romaine – ont été découverts sur les rives de l'Iffigsee (2065 m), le long du chemin menant au col du Schnidejoch [FIG. 2]<sup>10</sup>.

Un troisième ensemble d'artefacts remonte à l'âge du Bronze ancien (4100 – 3650cal. BP)<sup>11</sup> ; <sup>12</sup>. Il s'agit entre autres de fragments de chaussures de cuir ; d'une hampe de flèche en bois de noisetier ; d'anneaux de branches entrelacées qui devaient probablement servir à la fixation de marchandises sur des bêtes de somme [FIG. 6] ; d'un récipient aux parois en écorce de saule fixées à un fond en bois d'arolle par des liens d'épicéa ; et d'une aiguille à tête discoïdale en bronze à décor géométrique incisé<sup>13</sup>.



FIG. 6 – *Anneaux de bois de bouleau (à gauche) et d'épicéa (à droite) ; âge du Bronze ancien (2004).*

<sup>10</sup>Suter et al., 2005a, p.511; 514-515 et Grosjean et al., 2007, p.206.

<sup>11</sup>Les datations carbone-14 sont généralement reportées en terme d'années *before present* [BP] lequel est, par convention, fixé à l'an 1950. Le préfixe [cal.] BP indique que la datation est *calibrée*, (cf. point 3.1.1, p.54).

<sup>12</sup>Les analyses <sup>14</sup>C du site du Schnidejoch sont réalisées par la techniques radiocarbone AMS (*accelerator mass spectroscopy* à l'*Institute for Theoretical Physics* (ITP) de l'*Eidgenössische Technische Hochschule*(ETH) Hönggerberg. La préparation des échantillons s'effectue au *Radiokarbonlabor des Geographischen Institutes der Universität Zürich* (GIUZ).

<sup>13</sup>Suter et al., 2005a, p.506-508; 511; 514 ; et Grosjean et al., 2007, p.206.



Le groupe d'artefacts datant du Néolithique récent (4900 – 4450cal. BP) comprend un équipement de chasseur constitué d'un arc en if et sa corde en fibres animales; de plusieurs flèches en obier; d'un carquois en écorce de bouleau qui renfermait en son intérieur deux pointes de flèches en silex; d'un fragment de pèlerine en liber tressé du même type que celle que portait Ötzi<sup>14</sup>. Diverses pièces de fourrure et cuir, dont notamment des fragments de plusieurs chaussures [FIG. 7] et une jambière de pantalon ont également été retrouvés<sup>15</sup>.



FIG. 7 – *Fragment de cuir d'une chaussure néolithique (2004).*

Les années 2006 et 2007 n'ont pas été favorables à la poursuite des fouilles : des étés et automnes froids et humides n'ont pas permis la fonte de la neige accumulée lors des hivers précédents, et le banc de glace n'a donc pas libéré de nouveaux artefacts : seule quelques rares fragments ont été retrouvés dans le pierrier environnant.

### 1.1.3 Quelques résultats

Ces découvertes peuvent par certains aspects être qualifiées de sensationnelles : outre l'intérêt intrinsèque des artefacts quant aux techniques d'élaboration pré- et protohistoriques, ceux-ci fournissent de nouveaux indices sur la présence néolithique dans les étages alpins de haute altitude, ainsi que sur les passages transalpins à l'âge du Bronze et à l'époque romaine. Par ailleurs, l'étude des matériaux et les datations <sup>14</sup>C réalisées offrent un premier aperçu de l'histoire de ce col au cours des cinq derniers millénaires, emprunté durant les phases climatiques plus clémentes comme liaison directe entre la région de Thoune et la vallée du Rhône<sup>16</sup>. Ces datations, confrontées aux données issues de la recherche climatologique, montrent une bonne corrélation entre les périodes d'optimum climatique et la fréquentation du site, suggérant ainsi que le col n'a pu servir de passage qu'au cours de certaines fenêtres temporelles, entre lesquelles il devait être obstrué par les glaces<sup>17</sup>.

<sup>14</sup>Egg, 1992, p.81.

<sup>15</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.505-514; Suter *et al.*, 2005b, p.18 et Grosjean *et al.*, 2007, p.206.

<sup>16</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.505; 516-517.

<sup>17</sup>Grosjean *et al.*, 2007, p.205-206.

Un autre aspect particulièrement intéressant du site est la découverte de matériaux protéiques en excellent état de préservation. Ceux-ci ne sont en effet pas préservés dans les milieux subaquatiques tels que les habitats lacustres, principale source de connaissance sur les périodes néolithiques dans nos régions. Ainsi, les artefacts de cuir, les kératineux (fragments de textiles en laine romains) et les tendons (corde de l'arc), constituent des découvertes tout à fait exceptionnelles : il s'agit même des premiers cuirs néolithiques retrouvés sur territoire helvétique<sup>18</sup>.

#### 1.1.4 Recherches interdisciplinaires

Face à la richesse de ces découvertes, un groupe de recherches interdisciplinaires s'est rapidement mis en place. Celui-ci comprend les archéologues et techniciens de fouilles de l'ADB ; des spécialistes de divers domaines : analyse de l'ADN ancien, dendrologie, dendrochronologie, étude des cuirs, étude des textiles, paléobotanique, paléoclimatologie, paléozoologie, palynologie ; des conservateurs-restaurateurs (du laboratoire de l'ADB ainsi que d'autres laboratoires spécialisés dans les traitements de matériaux spécifiques).

Par ailleurs, l'ADB a fait appel à d'autres spécialistes et instituts en vue de la réalisation d'analyses / études spécifiques. Citons notamment l'analyse d'ADN humain, l'analyse des graisses contenues dans certains cuirs, des spécialistes d'archéologie expérimentale et bien sûr la réalisation de datation <sup>14</sup>C.

Dans un premier temps, le groupe de recherche avait pour consigne de tenir secret le lieu de découverte, afin de pouvoir procéder à l'évaluation du site sans avoir à mettre en place une surveillance permanente. Aujourd'hui, les spécialistes se réunissent environ deux fois par année, pour confronter leurs résultats et discuter des stratégies à venir.

Le Dr. Albert Hafner, archéologue responsable du secteur *Feuchtbodengrabungen*<sup>19</sup> à l'ADB, coordonne les séances.

### 1.2 Laboratoire de conservation-restauration

Dans sa configuration actuelle et suite à une réorganisation complète de son organigramme interne survenue entre 2006 et 2007, l'ADB se subdivise en quatre "ressorts"<sup>20</sup> : *Archaologische Untersuchung* ; *Grafik und Publikation* ; *Inventar und Archiv* ; *Restaurierung und Fundarchive*, sous la direction du Dr. Cynthia Dunning, archéologue cantonale.

Le ressort *Restaurierung und Fundarchive* se compose d'une dizaine d'employés fixes, auxquels s'ajoutent des conservateurs-restaurateurs engagés sur mandats. Le laboratoire dispose de vastes locaux qui s'articulent autour d'une salle centrale subdivisée en places de travail et postes spécifiques aux diverses opérations de conservation-restauration ainsi qu'en un espace central modulable. Les pièces annexes comprennent, entre autres, une salle d'eau dédiée au

---

<sup>18</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.505-514, Suter *et al.*, 2005b, p.17, Dr. Albert Hafner, entretien du 06 décembre 2007 et Marquita Volken, entretien du 18 décembre 2007.

<sup>19</sup>*Fouilles des sols humides* ; ce secteur comprend les fouilles subaquatiques ainsi que d'autres milieux "humides" tels que le site Lenk-Schnidejoch.

<sup>20</sup>J'utilise ici le terme *ressort* en traduction directe de l'allemand, *der Ressort*

nettoyage du mobilier archéologique, un atelier de photographie et une salle de radiographie. Deux places de travail sont mises à la disposition des stagiaires et diplômants. Légèrement à l'écart, l'ADB dispose d'un atelier équipé en gros outillage et machines diverses.

Mon stage de diplôme a eu pour cadre le laboratoire de conservation-restauration de l'ADB, sous la direction de Christoph Rogalla v.Bieberstein, responsable du ressort *Restaurierung und Fundarchiv*, et Sabine Brechbühl, conservatrice-restauratrice diplômée de la HEAA Arc, responsable de ce qui a trait au site Lenk-Schnidejoch pour la conservation-restauration.

### 1.2.1 Position et responsabilités

Le ressort *Restaurierung und Fundarchiv* est responsable du conditionnement et du traitement du mobilier archéologique exhumé dans le canton de Berne. En pratique, le laboratoire prend en charge le mobilier archéologique directement au sortir des fouilles pour assurer son stockage provisoire, son transport, les éventuels traitements de conservation-restauration, ainsi que son conditionnement à long terme (archivage et mise en dépôt). De plus, le laboratoire de conservation-restauration peut, sur demande des archéologues ou techniciens de fouilles, réaliser des prélèvements *in situ* techniques ou problématiques. Ce cahier des charges suppose également que le personnel du laboratoire se charge du suivi des artefacts si ceux-ci se voient confiés à des intervenants externes<sup>21</sup>.

Face à la découverte du site Lenk-Schnidejoch, le laboratoire de l'ADB s'est trouvé confronté à une problématique nouvelle qui a, dans une certaine mesure, provoqué une remise en question des protocoles de gestion des artefacts.

Tout d'abord, confronté à un "nouveau" milieu d'enfouissement – la glace –, les conservateurs-restaurateurs doivent s'interroger sur la manière adéquate de traiter et conditionner le mobilier issu de ce type de site. Par ailleurs, il s'agit là d'un site tout à fait exceptionnel qui focalise l'attention des milieux liés à l'archéologie et à la conservation du patrimoine culturel, et le laboratoire se doit d'assurer une parfaite transparence du processus global.

### 1.2.2 Transport et conditionnement

Si j'ai mentionné plus haut la réorganisation de l'ADB, c'est que celle-ci a impliqué une redéfinition des cahiers des charges des différents ressorts. Or, mon travail de diplôme s'inscrit justement dans un des points redéfinis : le transport des artefacts depuis un site de fouilles jusqu'aux locaux du service, qui relève aujourd'hui de la responsabilité du laboratoire de conservation-restauration. Ce dernier a toutefois la possibilité de déléguer cette tâche tout en donnant les directives générales. Précisons ici que le terme "transport" inclut les actions d'emballage et de conditionnement.

---

<sup>21</sup>Ce paragraphe, ainsi que les sections suivantes, ont été rédigés sur la base de nombreuses discussions avec Christoph Rogalla v.Bieberstein et Sabine Brechbühl, tout au long de mon stage de diplôme.

### 1.2.3 Traitement des matériaux organiques

Si le laboratoire de conservation-restauration vise, à moyen terme, au développement de son pôle de traitement des matériaux organiques, il n'est actuellement pas équipé pour répondre aux besoins d'un service archéologique dont l'un des pans d'activité est l'archéologie subaquatique. Au mieux peut-il à ce jour réaliser les traitements d'objets spécifiques, au cas par cas. Les artefacts en bois et les textiles sont aujourd'hui confiés à Ralf Riens du laboratoire de conservation de Constance (DE) ; les cuirs à Marquita et Serge Volken, du laboratoire *Gentle Craft* à Lausanne. Les recherches en cours au laboratoire de l'ADB ont pour objectif l'élaboration d'un concept général qui permette de conduire les traitements simultanés de lots d'artefacts.

Johanna Klügl, conservatrice-restauratrice diplômée de la *Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin* est responsable de cette branche du ressort.

### 1.2.4 Recherches interdisciplinaires et logistiques

Si le laboratoire de conservation-restauration de l'ADB ne procède pas lui-même au traitement des matériaux organiques, il occupe une position centrale dans la gestion du mobilier archéologique. A ce titre, il doit faire face aux questions essentielles de suivi des artefacts, ainsi que des opérations survenues.

La responsabilité du mobilier archéologique suppose également un contrôle des échantillons réalisés. D'une part, tout échantillon doit pouvoir être clairement localisé sur l'artefact dont il provient et être répertorié dans le système d'inventorisation de l'ADB ; d'autre part, il ne doit aucunement compromettre l'intégrité d'un objet<sup>22</sup>. Par ailleurs, le suivi des artefacts s'applique également aux prélèvements d'échantillons et il importe au laboratoire de conservation-restauration de savoir ce qu'il advient d'un échantillon pour pouvoir le récupérer dans le cas d'une analyse non destructive. Le laboratoire de l'ADB se propose ainsi de centraliser et systématiser les protocoles de prélèvement d'échantillons.

En pratique, les objets transitent par divers spécialistes pour la réalisation d'études et / ou analyses spécifiques, et des traitements de conservation-restauration. Des échantillons peuvent être prélevés à diverses étapes : aussi, il relève vite de la gageure que de garder une vue d'ensemble du processus. Sabine Brechbühl supervise ces divers aspects logistiques liés au site Lenk-Schnidejoch.

---

<sup>22</sup>Certaines analyses nécessitent en effet une quantité non négligeable de matière : la question de la localisation du prélèvement revêt alors toute son importance.

### 1.3 Description du projet

La problématique soulevée par la découverte du site Lenk-Schnidejoch ne se limite évidemment pas aux seuls aspects logistiques : en amont survient toute une série de questions plus spécifiquement liées à la préservation des artefacts, et plus particulièrement des matériaux organiques :

- **Comment procéder au dégagement des objets pris dans une matrice de glace ?**
- **Quel est l'état général de préservation des matériaux issus de la glace ?** Et, à partir de là : quels sont les matériaux les plus problématiques, les interventions nécessaires et leur degré de priorité ?
- **Comment procéder à l'emballage, au conditionnement in situ et au transport des artefacts ?**
- **Comment ne pas hypothéquer les futures analyses scientifiques ?** Quels sont les précautions nécessaires tant au niveau de la manipulation que du choix des matériaux d'emballage ou des conditions de stockage ? A quel moment procéder au prélèvement des échantillons ?
- **Quel serait le protocole idéal de transmission des artefacts entre les différents spécialistes ?**

Afin d'apporter des réponses à quelques unes de ces questions, le personnel du laboratoire de conservation-restauration de l'ADB a démarré un programme de recherche intitulé "*In-Situ-Bergungstechniken und Transport von organischen Materialien aus dem Eis*"<sup>23</sup>, qui porte le n° de projet 1182, se référant au secteur "développement de techniques".

Ce programme de recherche comprend deux diplômants en conservation-restauration. Pour son mémoire de diplôme, Charlotte Rerolle, étudiante en *Master de conservation-restauration de biens culturels* à l'université Paris I – Panthéon Sorbonne, s'est intéressée à la problématique du dégagement des artefacts piégés dans la glace. Mes recherches concernent l'emballage et le transport (du site au laboratoire) des matériaux organiques issus de ce milieu.

Le champ d'application de ce projet se situe très haut dans le processus global qui entoure le mobilier archéologique du site Lenk-Schnidejoch. Il s'agit d'un travail de terrain qui a pour objectif le développement de techniques de dégagement adaptées au milieu particulier qu'est la glace d'une part ; et l'application de certains des impératifs de la conservation dès la découverte d'un artefact et pour son transport d'autre part.

#### 1.3.1 Problématique : le conditionnement in situ et le transport des matériaux organiques issus de la glace

Lors de la campagne de fouilles 2005 sur le site du Schnidejoch a été mis au jour la partie centrale d'un carquois en écorce de bouleau et cuir, ou plus précisément un étui qui servait à la fois au transport d'un arc et de flèches [FIG. 9]<sup>24</sup>. Un autre exemplaire de carquois, bien que très différent, avait déjà été découvert en 1991 sur le col de l'Hauslabjoch [FIG. 8]<sup>25</sup>.

---

<sup>23</sup> "Dégagement, conditionnement *in situ* et transport des matériaux organiques issus de la glace"

<sup>24</sup> Suter *et al.*, 2005a, p.509.

<sup>25</sup> Egg, 1992, p.38-39.



FIG. 8 – Dégagement du carquois d'Ötzi; Col de l'Hauslabjoch (1991).



FIG. 9 – Partie centrale du carquois néolithique (ou étui à arc et flèches); Lenk-Schnidejoch (2005).

Pour reprendre les termes de A.H. Peters, V. Cassman et M. Gustafsson :

« *Great find – Now what ?* » (Peters et al., 2007, p.134.)<sup>26</sup>

Le conservateur-restaurateur focalisera son attention sur les matériaux constitutifs, leur état à la mise au jour et sur les caractéristiques du milieu d'enfouissement pour réfléchir à un conditionnement adapté – centre de mon travail –, puis aux traitements de conservation-restauration que nécessitent les différents matériaux.

L'archéologue s'attachera à la récolte des indices susceptibles de répondre à de multiples questions qui, au niveau des artefacts, concernent notamment : la datation, la provenance, les procédés de fabrication, l'usage et les circonstances d'abandon de l'artefact. Pour ce faire, diverses méthodes d'investigation pourront être mises en oeuvre parmi lesquelles des analyses scientifiques<sup>27</sup>. Ces dernières pourront requérir, selon les cas, le respect de certaines mesures afin d'éviter toute contamination qui pourrait compromettre les résultats – mesures qui devront alors être appliquées dès la découverte d'un artefact. Cet aspect de "sécurisation des indices" fait partie intégrante des exigences de mon travail.

<sup>26</sup>Dans son contexte d'origine, cette formule constitue un titre de section qui synthétise les discussions entre archéologues et conservateurs au sujet d'artefacts associés à des restes humains.

<sup>27</sup>Giligny et Lehöerff, 2002, p.83;111-126 et Giligny, 2002, p.159.

PORTÉE ET LIMITES DU PROJET. Au cours des discussions préalables d'élaboration de ma partie du projet avec Christoph Rogalla v.Bieberstein et Sabine Brechbühl, les objectifs suivants ont été définis :

1. Proposer un modèle d'emballage qui réponde aux besoins des matériaux organiques issus de la glace ;
2. Définir les caractéristiques d'un conditionnement adéquat pour le stockage *in situ* des artefacts ;
3. Déterminer les mesures nécessaires à la préservation du potentiel d'analyse des artefacts.
4. Pourvoir à un système de transport du mobilier archéologique, du site au laboratoire, adapté au conditionnement tout comme à la protection physique des artefacts ;
5. Développer un concept de transport qui permette l'acheminement par voie pédestre de l'ensemble du matériel jusqu'au site.

Dans un même temps, plusieurs limites ont été fixées, de manière à cerner une problématique spécifique et à réduire quelque peu le champ d'étude :

- La première limitation concerne le type de matériau considéré : mon travail ne traite que des matériaux organiques ;
- Le champ d'application de ma problématique se limite au terrain et au trajet entre le site et le laboratoire ; la prise en charge du mobilier au laboratoire de conservation-restauration constitue une nouvelle étape qui ne sera pas abordée ici ;
- Pour le transport, seuls sont pris en compte les artefacts "raisonnablement transportables" dans ou sur un sac à dos. Les artefacts trop lourds ou volumineux demandent en effet la mise en place d'une logistique toute autre.

CONTRAINTES. Le site Lenk-Schnidejoch étant éloigné de plusieurs heures de marche de toute voie carrossable, l'ensemble des techniques développées doit rester transportable à dos d'homme. Ainsi, le poids constitue l'une des principales contraintes de ce projet. La seconde contrainte à relever ici est d'ordre temporel : le laboratoire de l'ADB nous offrait, à Charlotte Rerolle et moi, la formidable opportunité de mettre à l'épreuve les méthodes développées, en conditions réelles, pour la campagne de fouille 2007 (qui n'aura finalement jamais lieu). Quoi qu'il en soit, le projet visait à un certain degré d'aboutissement dès les mois d'automne, pour une date inconnue dépendante de facteurs météorologiques, soit trois à quatre mois après le début de mon stage de diplôme. Il nous fallait dès lors identifier les problèmes ; formuler / conceptualiser des solutions potentielles ; tester les options retenues et effectuer les choix nécessaires pour préparer le matériel dans un laps de temps très réduit.

SYNTHÈSE. Ainsi, le présent travail de diplôme vise à apporter des réponses sous forme de solutions pratiques quant à la manière de procéder suite à la mise au jour de matériaux organiques dans un milieu gelé. Il s'agit avant tout d'un travail de conservation préventive, dans la mesure où il traite des opérations en amont de toute intervention directe sur les artefacts. La plupart des points que touche ce projet se retrouvent d'ailleurs dans la définition que donne l'*European Confederation of Conservator-Restorers' Organisations* (E.C.C.O.) de la conservation préventive :

« *Preventive Conservation consists of indirect action to retard deterioration and prevent damage by creating conditions optimal for the preservation of cultural heritage as far as is compatible with its social use. Preventive conservation also encompasses correct handling, transport, use, storage and display. [...]* » (E.C.C.O., 2002, *Professional Guidelines (III)*.)

Mon travail concerne en effet les actions indirectes telles que les mesures de manipulation, d'emballage et de conditionnement des artefacts pour le stockage *in situ* et le transport jusqu'au laboratoire de l'ADB. Il s'agit ici d'offrir des conditions optimales à la préservation des matériaux. Ces dernières devront permettre aux spécialistes chargés de l'étude, des analyses ou du traitement des artefacts, de mener une réflexion globale quant aux opérations à entreprendre, sans que celle-ci ne soit biaisée par les interventions de terrain.

### 1.3.2 Méthodologie

Afin de chercher à répondre aux différents aspects de cette problématique, mon travail se subdivise en quatre axes, qui se retrouvent dans la structure générale de ce document :

1. Les matériaux organiques dans la glace ;
2. Etudes et analyses scientifiques – mesures de sécurisation des indices ;
3. Emballage et protection des artefacts ;
4. Stockage *in situ* et transport.

Les deux premiers points constituent le cadre théorique de ce travail : ils s'attachent à identifier les paramètres et critères à prendre en compte pour les aspects plus pratiques que sont le conditionnement *in situ* et le transport des artefacts (points 3 & 4). Le premier groupe (points 1 & 2) vise à définir les lignes directrices de mon projet, du point de vue de la conservation-restauration d'une part, au travers de la compréhension des processus d'altération / préservation des matériaux organiques dans la glace (puis au moment de leur mise au jour) ; selon la perspective de la recherche archéologique d'autre part, et des exigences de préservation des indices qu'implique cette dernière. Le second groupe suit un ordre quasi chronologique, de la découverte d'un artefact à l'arrivée au laboratoire de l'ensemble du mobilier. S'agissant d'une seule et même problématique de conditionnement *in situ*, le découpage en deux parties revêt ici un caractère quelque peu artificiel : il répond toutefois aux types de solutions envisagées avec, en premier lieu, la description des matériaux et options d'emballage "direct" ; le conditionnement, stockage et transport d'un ensemble d'artefacts venant dans un second temps.

Les sections suivantes décrivent les questions abordées sous ces différents points et résument les moyens mis en oeuvre pour chercher à y répondre.



## LES MATÉRIAUX ORGANIQUES DANS LA GLACE [p.28–51]

*Quelles sont les caractéristiques des matériaux organiques préservés dans la glace ?*  
*Quels risques découlent de la mise au jour des artefacts ?*

Après une première section où sont recensés les principaux types de sites dans lesquels des matériaux organiques peuvent être préservés par le froid, cette partie vise à caractériser la glace comme milieu d'enfouissement. Quels sont les processus de dégradation des matériaux organiques dans la glace ? Ou, de manière plus exacte : comment certains facteurs d'altération y sont-ils inhibés ? Les questions subséquentes concernent les implications de la mise au jour quant à la reprise des processus d'altération. Il s'agit ainsi de comprendre les processus de dégradation / décomposition en jeu avec, pour objectif, de définir les paramètres sur lesquels il sera possible d'intervenir afin de limiter les altérations pour le stockage *in situ* et durant le transport.

Cette partie se base essentiellement sur des recherches effectuées dans la littérature spécialisée de la conservation-restauration en milieux gelés (contextes alpins, polaires et de permafrost) ainsi que sur des échanges avec des spécialistes de conservation-restauration de différents matériaux.

## ÉTUDES ET ANALYSES SCIENTIFIQUES – MESURES DE SÉCURISATION DES INDICES [p.52–64]

*Quelles analyses sont susceptibles d'être entreprises ?*  
*Comment ne pas risquer de les compromettre ?*

Les artefacts organiques préservés dans la glace présentent un état général de conservation exceptionnel, ce qui ouvre la voie à toute une gamme d'analyses scientifiques qui peuvent apporter des éléments de connaissance divers. Le but n'est pas ici d'en comprendre les détails ni d'en dresser la liste exhaustive. Néanmoins, ces analyses ne sont souvent réalisables que si les échantillons ne sont pas contaminés par une manipulation irréfléchie ou des conditions de stockage inadéquates (ces paramètres variant en fonction de l'analyse considérée). Ainsi, les opérations de prélèvement, d'emballage et de stockage doivent tenir compte de l'aspect de sécurisation des indices archéologiques.

Cette partie donne un aperçu, au travers de quelques exemples, du potentiel d'analyse des matériaux organiques préservés dans la glace et cherche à définir les mesures à respecter afin de ne pas risquer de compromettre certaines analyses spécifiques.

Mes recherches reposent ici pour une grande part sur les contacts entretenus avec les spécialistes des études et analyses qui collaborent avec le service archéologique du canton de Berne, ainsi que sur la littérature qui traite des analyses réalisées sur le mobilier archéologique du Hauslabjoch et d'autres sites "gelés".

## EMBALLAGE ET PROTECTION DES ARTEFACTS [p.65–83]

*Quelles sont les solutions d'emballage adaptées aux différents cas de figure ?*

Au vu des besoins spécifiques des matériaux organiques et des risques de pollution / contamination, cette partie définit les critères de sélection et présente les tests et choix effectués pour les matériaux et outils nécessaires à la réalisation d'emballages adaptés aux différentes situations susceptibles d'être rencontrées sur un site de haute altitude. Il s'agit là d'un des points centraux du travail pratique réalisé pour l'ADB qui consiste à définir des "scénarii de découverte" afin de prévoir, sélectionner, tester et enfin préparer l'équipement d'intervention *in situ*. Cet aspect de la logistique est essentiel pour un site distant de plusieurs heures de marche : une fois sur place, il ne sera plus possible d'agir (et improviser) qu'à partir du matériel emporté. Sont décrits ici les protocoles et options d'emballage de différents types d'artefacts, selon l'état au moment de la découverte et les caractéristiques intrinsèques d'un objet (matériaux constitutifs, forme et dimensions, fragilité, etc.).

Les solutions décrites ici découlent des recherches effectuées pour les parties précédentes, de l'observation des caractéristiques du mobilier archéologique exhumé à ce jour, des recommandations des spécialistes en conservation-restauration et analyses des matériaux organiques, ainsi que des réflexions menées tout au long de mon travail.

STOCKAGE *in situ* ET TRANSPORT [p.84–108]

*Comment procéder au stockage in situ des artefacts en milieu alpin ?*  
*Comment assurer un transport "sécurisé" des artefacts du site au laboratoire ?*

Une fois les objets prélevés et emballés, il est encore nécessaire de veiller à *maintenir* des conditions environnementales stables de manière à ne plus infliger aux matériaux de changements brusques. Un autre aspect est de parvenir à protéger les objets afin de limiter les risques d'altération mécanique liés à la randonnée alpine (tassement, vibrations, ou choc en cas de chute).

Cette partie présente les étapes de conception, tests des options et de réalisation d'un caisson isotherme et du système de calage interne qui permette à la fois :

- le maintien de conditions climatiques appropriées sur le site et jusqu'à l'arrivée au laboratoire ;
- la protection physique des artefacts au cours du trajet de retour.

Les sections suivantes décrivent les solutions pratiques de stockage *in situ*, les mesures d'utilisation optimales du caisson, puis l'alternative d'un second couvercle avec système d'apport de froid intégré pour la seconde partie du transport, qui se branche sur l'allume-cigare d'un véhicule. Par ailleurs cette partie comporte les critères de sélection et choix du "système global de transport" permettant d'acheminer l'ensemble des techniques développées par Charlotte Rerolle pour le dégagement des artefacts, ainsi que l'équipement de conservation nécessaire au travail de terrain.

La conception et réalisation du caisson isotherme repose en grande partie sur les conseils pratiques que m'ont prodigués des spécialistes et professionnels de domaines divers tels que conservation préventive, cryogénie, isolation

thermique des bâtiments et physique. Le système de calage interne consiste en partie en une adaptation de solutions utilisées pour le conditionnement de restes ostéologiques. Le choix de l'équipement de transport découle de besoins spécifiques à la randonnée alpine et s'est effectué par la sélection d'articles existant sur le marché.

## 2 Les matériaux organiques dans la glace

La dégradation des substances organiques est un processus naturel, partie intégrante du cycle de la matière au travers de la biosphère. Les matériaux organiques tels que le bois, la peau, le cuir, les textiles et les fibres végétales ne sont préservés que dans des conditions particulières (souvent référées en tant qu'*extrêmes*) car ils constituent une source de nourriture pour une myriade d'organismes : tels que bactéries, moisissures, insectes, rongeurs et autres charognards. Ces matériaux sont en outre très sensibles aux variations des conditions physico-chimiques d'un milieu. Ainsi, ce n'est que dans des situations *stables*, et où l'activité biologique est *notablement réduite*, que les artefacts à base de matériaux "périssables" peuvent échapper aux processus de décomposition<sup>28</sup>. Toutefois, ces derniers n'affectent pas toutes les substances organiques au même degré : la lignine est par exemple *relativement* stable, et peut permettre la survie pour des durées prolongées d'artefacts dans certains environnements, dont les sites lacustres constituent l'exemple le plus connu. Parmi les matériaux d'origine animale, les matières osseuses sont les plus fréquemment rencontrées en raison de la fraction *biominérale* qui les compose<sup>29</sup>.

Les substances organiques constituent peut-être les vestiges archéologiques les plus mal connus : des estimations basées sur les sites subaquatiques et sur des comparaisons ethnographiques, laissent supposer que la majeure partie de la culture matérielle des sociétés préhistoriques devait être réalisée à partir de matériaux organiques et n'a ainsi que rarement pu survivre aux conditions d'enfouissement "typiques" des zones climatiques tempérées<sup>30</sup>. L'intérêt majeur des sites dits "gelés" découle de la préservation potentielle de la totalité des matériaux organiques, à la différence des sites subaquatiques où seule une fraction d'entre eux est "retrouvée"<sup>31 ; 32</sup>.

Cette partie se divise de la manière suivante : une première section (2.1) fournit un bref aperçu des types de sites "gelés", de leurs principales caractéristiques, et des matériaux qui y ont été retrouvés. La présence de milieux gelés dépendant des conditions climatiques, les enjeux de l'évolution du climat sur l'archéologie et la préservation de tels sites y sont ensuite abordés. Une brève introduction à la diversité des substances organiques constitue la section suivante (2.2). Après laquelle je m'attache à caractériser la glace comme milieu d'enfouissement, les processus de dégradation des matériaux organiques en jeu, puis, finalement, les conséquences de la mise au jour.

### 2.1 L'archéologie dans la glace

#### 2.1.1 Types de sites

Les sites archéologiques susceptibles de préserver des matériaux organiques par le froid se divisent en quatre types principaux : les terrains de chasse que constituent les *ice patches* de Norvège et du continent nord-américain ; les

---

<sup>28</sup>Cronyn, 1990, p.240-243 ; Blanchette, 2000, p.189 ; Logan *et al.*, 2001, p.138 ; Allsopp *et al.*, 2004, p.6 ; Goffer, 2007, p.271-272.

<sup>29</sup>Regert et Rolando, 1996, p.118-119 ; Allsopp *et al.*, 2004, p.11 ; Goffer, 2007, p.172.

<sup>30</sup>Logan *et al.*, 2001, p.137-138 ; Drooker, 2001, p.6 qui se réfère à : Coles, J.M. Prologue : Wetland Worlds and the Past Preserved. In Bernick, Kathrynn (ed.), *Hidden Dimensions : The Cultural Significance of Wetland Archaeology*. UBC Press, Vancouver, 1998, p.3-23.

<sup>31</sup>Fraction déjà très large au demeurant.

<sup>32</sup>Dr. Albert Hafner, entretien du 06 décembre 2007.

contextes d'altitude (accidents et cols de montagne) ; certains habitats semi-souterrains en zone de permafrost ; et les contextes funéraires (d'altitude ou dans le permafrost)<sup>33</sup>. Les vestiges des expéditions historiques en Arctiques et Antarctiques constituent un dernier groupe de sites gelés, qui ne sera pas abordé dans ce travail.

Les milieux d'enfouissement peuvent ainsi se répartir en deux groupes principaux : le permafrost, où le mobilier archéologique est inhumé dans un sol gelé ; et les glaciers et *ice patches*, dans lesquels les artefacts sont piégés à même la glace. L'existence de tels milieux étant elle-même dépendante du climat atmosphérique, ces sites se concentrent sous de hautes latitudes ou en haute altitude.

LE PERMAFROST. le terme permafrost (ou pergélisol) désigne tout terrain (sol ou roche) de sub-surface dont la température reste inférieure à 0°C l'année durant. Un permafrost présente une couche inférieure gelée en permanence et une *couche active* (ou mollisol), tranche supérieure du sol affectée par le dégel estival, qui supporte l'ensemble de l'activité biologique<sup>34</sup>. Les zones de permafrost s'étendant sur environ un cinquième des terres émergées de l'hémisphère nord<sup>35</sup>, il existe de nombreux contextes archéologiques en sol gelé en Alaska, au Canada, au Groenland et en Sibérie.

Le permafrost est avant tout connu au travers des kourganes scythes<sup>36</sup>, les célèbres *tombes gelées* de Sibérie. La nécropole de Pazyryk, dans l'Altaï russe, comprend une quarantaine de kourganes, fouillés dès 1929 par l'archéologue S.I. Rudenko. Les souverains scythes de la culture de Pazyryk étaient inhumés accompagnés d'un abondant mobilier funéraire, et de chevaux sacrifiés rituellement. Dans quelques unes de ces tombes, des momies humaines et d'équidés et l'ensemble du mobilier ont pu être retrouvés : chambres funéraires de rondins, sarcophages et objets de bois ; harnais, vêtements, tapisseries en textiles, feutre ou cuir ; coussins bourrés de fibres végétales ou animales ; armes, ornements et autres artefacts métalliques, etc.<sup>37</sup>.

L'os, le bois, l'écorce, l'ivoire de morse, peau, cuir et fourrure sont les matériaux organiques fréquemment rencontrés dans les sites préhistoriques de l'Arctique<sup>38</sup>. Les artefacts retrouvés dans la *couche active* présentent des états de dégradation variables – lorsqu'ils ne se sont pas totalement désintégrés. La sédimentation détritique étant généralement lente (voire inexistante) dans ces zones, l'origine même de l'enfouissement déterminera la qualité de préservation de la matière organique. Une habitation avec une superstructure importante pourra, en s'effondrant, former une couche de dépôt suffisamment épaisse pour protéger les artefacts abandonnés en son intérieur<sup>39</sup>. A ce

---

<sup>33</sup>Dr. Albert Hafner, entretien du 06 décembre 2007.

<sup>34</sup>Pitulko, 2007, p.29-31 ; PERMOS, 2007, p.26&30 ; Hurault, 2005, p.89 ; Hett, 1987, p.64 ; Frank Press & Raymond Siever, 2002, p.345-346.

<sup>35</sup>Frank Press & Raymond Siever, 2002, p.345.

<sup>36</sup>“Kourgane” est la désignation russe d'un *tumulus*, colline artificielle (de terre et de pierre) qui recouvre une sépulture. “Scythe” est un terme générique qui regroupe plusieurs populations nomades ou semi-nomades des steppes eurasiennes de l'âge du Fer. (Gheyle *et al.*, 2006, p.19.)

<sup>37</sup>Rolle, 1992, p.334-335 ; 340 ; Gheyle *et al.*, 2006, p.19-20 ; Deutsches Archäologisches Institut (DAI), 2008.

<sup>38</sup>Zimmerman et Smith, 1975, p.834-835 ; Hett, 1987, p.65 ; Hansen *et al.*, 1991, p.34-47 ; Grant, 1993, p.5-6.

<sup>39</sup>Hett, 1987, p.64 ; Grant, 1993, p.5.

titre, les kourganes scythes, présentent des conditions d'enfouissement optimales.

LES SÉPULTURES D'ALTITUDE. Les sacrifices d'enfants sur les sommets de certaines montagnes des Andes péruviennes, argentines et du Chili semblent avoir constitué une pratique rituelle relativement répandue de la civilisation inca au 15<sup>e</sup> et 16<sup>e</sup> siècle. Les nécropoles de ce type, dont la première fut découverte en 1905, se situent à des altitudes comprises entre 5200 et 6700 m, ce qui, sous l'effet de températures constamment négatives et de taux d'humidité relative (HR) très bas, a permis la momification naturelle des corps, la préservation des vêtements et du mobilier funéraire<sup>40</sup>.

LES GLACIERS ET COLS DE MONTAGNE. Les glaces de haute altitude constituent un autre contexte dans lequel des matériaux organiques archéologiques sont parfois retrouvés. De manière générale, les glaciers ne sont pas favorables à la préservation de matériel archéologique ancien : ce sont des corps mouvants qui "s'écoulent" le long des pentes, ce qui, dans la plupart des cas, limite à quelques siècles le laps de temps durant lequel un glacier pourra contenir du mobilier archéologique avant de le libérer<sup>41</sup>. De plus, les importantes contraintes physiques qui s'y exercent aboutissent à la destruction mécanique des vestiges.

Les découvertes en 1988 aux abords du glacier *Porchabella* aux Grisons des restes anthropologiques et des effets personnels d'une jeune femme ayant vécu au 16<sup>e</sup> ou 17<sup>e</sup> siècle<sup>42</sup>, ou en 1985 au *Theodulgletscher* en Valais d'un soldat du dernier quart du 16<sup>e</sup> siècle et de son équipement illustrent parfaitement cette problématique : dans les deux cas, les vestiges (restes osseux, pièces de vêtement et équipement) ont été découverts sur plusieurs années, relativement éparpillés et très fragmentés<sup>43</sup>.

Le site de découverte d'Ötzi se situe à 3210 m d'altitude, sur le col du *Hauslabjoch* dans un secteur de faible dénivellation. Plus précisément, et c'est là le facteur déterminant, il s'agit d'une dépression (ou faille) rocheuse d'une vingtaine de mètres de longueur, pour une largeur de 4–6 m, et une profondeur de 3–5 m, orientée perpendiculairement à la pente. Jusque dans les années 60, la zone était encore rattachée au glacier du *Niederjochferner*, mais la dépression a vraisemblablement dû être entièrement recouverte de glace et de neige jusqu'aux semaines qui précédèrent la découverte du corps. Ainsi, le mobilier archéologique qui compose cette découverte exceptionnelle a pu être préservé durant plus de cinq millénaires dans un glacier, protégé des mouvements de la glace par sa position au fond d'une dépression<sup>44</sup>.

Certaines situations topographiques particulières peuvent ainsi offrir des contextes propices à la préservation de vestiges organiques sur de longues durées : la caractéristique principale en est une certaine immobilité de la glace. Les autres paramètres tels qu'abandon des vestiges, leur recouvrement rapide par la neige (qui les protège à la fois de l'exposition aux éléments et à la faune alpine) et la persistance de la couche de neige / glace jusqu'au moment de

---

<sup>40</sup>Horne, 1996, p.153 ; Peters *et al.*, 2007, p.141-144.

<sup>41</sup>Meyer, 1992, p.321.

<sup>42</sup>Kaufmann, 1996, p.239-246.

<sup>43</sup>Meyer, 1992, p.325-329.

<sup>44</sup>Lippert, 1992, p.245-247 ; Bagolini *et al.*, 1995, p.3.

leur découverte, relèvent d'un concours de circonstances. La découverte d'Ötzi en 1991 et de celle, en 2003, du site du Schnidejoch en constitue deux exemples uniques<sup>45</sup>.

ICE PATCHES. Les *ice patches* (ou bancs de glace) sont des accumulations de glace permanentes qui se différencient des glaciers en cela qu'ils n'acquièrent pas une masse suffisante pour s'écouler<sup>46</sup>. Ces dernières années, la fonte accélérée de ces bancs de glace a libéré de nombreux exemplaires d'artefacts en matériaux organiques pour la plupart liés à une activité spécifique : la chasse. Le caribou ou le renne sont connus pour se réfugier sur les *ice patches* au cours des mois d'été, tant pour des besoins de régulation thermique que pour échapper aux insectes<sup>47</sup>.

Les premières découvertes dans de tels contextes remontent aux années 30, dans le comté de l'Oppland en Norvège [FIG. 10], puis dès 1997 dans le Yukon (Canada) et en Alaska<sup>48</sup>. La quasi totalité des artefacts découverts à ce jour (près de 250 au total) représentent des exemplaires d'armes de jet tels que propulseurs, sagaies, arcs et flèches. Les datations <sup>14</sup>C réalisées sur l'ensemble nord-américain couvrent presque tout l'Holocène, avec une datation de  $8360 \pm 60$  BP (non calibrée) pour le plus ancien artefact, et de  $90 \pm 40$  BP pour le plus récent<sup>49</sup>. En Norvège, la résine d'une pointe de flèche lithique est datée de  $3925 \pm 25$  BP<sup>50</sup>. Les principaux matériaux constitutifs de ces ensembles d'artefacts sont le bois, l'andouiller et l'os avec des pointes lithiques ou d'andouiller. Certains exemplaires entièrement préservés de flèches ou de sagaies présentent encore à leurs extrémités les ligatures de fixation des pointes à base de tendons ou un empennage de plumes. Quelques rares artefacts en peau ou cuir, dont une sacoche et un mocassin, ont également été retrouvés<sup>51</sup>.



FIG. 10 – Découverte d'un artefact sur un ice patch de Norvège (1937).

### 2.1.2 Réchauffement climatique et préservation des sites

« *Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice and rising global average sea level.* » (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC), 2007, p.30.)

<sup>45</sup>Meyer, 1992, p.321-322 ; zur Nedden *et al.*, 1994, p.811 ; Grosjean *et al.*, 2007, p.204-206.

<sup>46</sup>Farnell *et al.*, 2004, p.247, d'après : Glen, J.W. The Creep of Polycrystalline Ice. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A : Mathematical and Physical Sciences*. 1955, 228, 1175, p.519-538 et Paterson, W.S.B., *The Physics of Glaciers*. 2nd ed. Pergamon, Toronto, 1981.

<sup>47</sup>Farnell *et al.*, 2004, p.248 ; Åstveit, 2007, p.21.

<sup>48</sup>citep[p.4-6]j-abhorelenorwegianspeaking ; VanderHoek *et al.*, 2007a, p.185.

<sup>49</sup>Hare *et al.*, 2004, p.260.

<sup>50</sup>Åstveit, 2007, p.21.

<sup>51</sup>Hare *et al.*, 2004, p.260-269 ; VanderHoek *et al.*, 2007a, p.185 & 196 ; Åstveit, 2007, p.21 ; Dove *et al.*, 2005, p.38.

Les conséquences du réchauffement climatique global sur la préservation de tels sites archéologiques sont évidentes :

- L'augmentation de la température de l'air réchauffe le permafrost ; à moyen terme, il disparaîtra en de nombreux endroits, entraînant la décomposition rapide des matériaux organiques préservés à l'état gelé jusqu'à nos jours<sup>52</sup>. La couche active, dont l'épaisseur est considérée comme un bon indicateur climatique (signal direct des températures moyennes de l'année)<sup>53</sup>, n'est pas favorable à la préservation des vestiges organiques<sup>54</sup>.
- En Amérique du Nord, les *ice patches*, qui reflètent un équilibre sensible entre accumulation et ablation (fonte + évaporation) de neige / glace, ont entamé une fonte rapide, exposant ainsi les artefacts aux éléments<sup>55</sup>. Il en va de même en Suisse, où le banc de glace du Schnidejoch, autrefois partie intégrante du *Tungelgletscher*, est aujourd'hui en phase de disparition<sup>56</sup>.
- Dans les Andes, la fonte des glaces et des sols gelés provoque des avalanches et glissements de terrain qui perturbent certaines sépultures d'altitude, emportant les vestiges ou les laissant partiellement exposés<sup>57</sup>.

Ces quelques faits témoignent tous d'une même réalité : la préservation exceptionnelle des vestiges archéologiques organiques dans la glace n'est, à moyen terme, aucunement garantie. La disparition des bancs de glace et la fonte du permafrost est un processus en cours *actuellement*, et il ne sera par le futur plus possible de procéder aux mêmes études de ces données archéologiques irremplaçables. Aussi, est-il essentiel pour les chercheurs de se trouver à la bonne place, au bon moment.

### 2.1.3 Prospection, découverte et surveillance des sites

Face à cette situation, divers organismes régionaux, nationaux ou intergouvernementaux ont inscrit au nombre de leurs priorités la surveillance de zones sensibles, susceptibles de contenir des vestiges archéologiques menacés. Ces projets et missions ont généralement pour premier objectif le recensement des sites, afin de mettre en place une politique de surveillance, ou de procéder aux fouilles d'un site particulier.

Ainsi, l'*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) a récemment initié un vaste projet de sauvegarde du patrimoine archéologique du massif de l'Altaï, utilisant à la fois des techniques de surveillance satellite et des investigations de terrain<sup>58</sup>.

Depuis 1997, les études interdisciplinaires menées au Yukon par le *Yukon Ice Patch Research Project* et dans la région du *Denali Highway* en Alaska par l'*Alaska Office of History and Archaeology* ont recensé une vingtaine d'*ice*

---

<sup>52</sup>PERMOS, 2007, p.26 ; Deutsches Archäologisches Institut (DAI), 2008.

<sup>53</sup>PERMOS, 2007, p.30

<sup>54</sup>Hett, 1987, p.64.

<sup>55</sup>Farnell *et al.*, 2004, p.251 ; VanderHoek *et al.*, 2007b, p.67.

<sup>56</sup>Grosjean *et al.*, 2007, p.204-206.

<sup>57</sup>Peters *et al.*, 2007, p.143.

<sup>58</sup>Voir notamment Gheyle *et al.*, 2006, p.19-23.





FIG. 11 – Col de l'Hauslabjoch 1991 – Excavation de la faille rocheuse.



FIG. 12 – Col de l'Hauslabjoch 1992 – Vue du site : la partie occidentale est alors libre de glace.

patches comportant des traces archéologiques<sup>59</sup>. En Norvège, le projet ARCCLIM (*Archaeology and Climate*) signale également une recrudescence des artefacts libérés par la fonte de certains *ice patches* et glaciers<sup>60</sup>.

Dans nos régions, la découverte de sites d'altitude s'est toujours effectuée de manière fortuite. Pourtant, certaines zones peuvent être déterminées comme "sensibles" et l'ADB vise à mettre en place une politique de contrôle de quelques secteurs alpins<sup>61</sup>. C'est notamment le cas de la région du *Lötschenpass*, où des arcs en bois d'if néolithiques et de l'âge du Bronze ont été découverts dans les années 30–40<sup>62</sup>.

#### 2.1.4 Méthodes de dégagement

Les méthodes de dégagement des artefacts pris dans la glace sont très différentes de celles qu'il est possible de mettre en oeuvre dans un permafrost ; seules les premières sont abordées ici. La glace constitue un milieu d'enfouissement particulier, ne présentant pas de structures et où les artefacts émergent à mesure que progresse la fonte. A ma connaissance, la seule véritable politique d'*excavation* mise en oeuvre à ce jour est le dégagement de la zone de découverte d'Ötzi, en 1992 au cours de laquelle la totalité de la neige, glace et eau de fonte ont été évacuées au moyen de diverses techniques [FIG. 11 & 12]<sup>63</sup>.

Sur le site du Schnidejoch, les techniques se sont limitées à la prospection systématique de la zone et au prélèvement des artefacts déjà libérés, ou émergeant du banc de glace. Occasionnellement, de l'eau de fonte a pu être versée autour d'un objet encore partiellement prisonnier, pour en accélérer le dégagement. Charlotte Rerolle a, pour

<sup>59</sup>Farnell *et al.*, 2004, p.247-248 ; et VanderHoek *et al.*, 2007a, p.185.

<sup>60</sup>Åstveit, 2007, p.21 ; Finstad, 2007.

<sup>61</sup>Le projet *Alpine Prospektion* de ressort *Inventar und Archiv* a pour objectif principal le recensement des sites archéologiques situés au-dessus de la limite forestière. Une première étape du projet consiste à effectuer le relevé systématique de régions tests, afin d'évaluer le potentiel archéologique des secteurs alpins, qui recouvrent près de la moitié de la superficie du canton de Berne et dont l'étude demeure très lacunaire. Renate Ebersbach et Elisabeth Zahnd, co-responsables du ressort, projettent également d'étendre ce type de contrôle aux abords de certains glaciers. (Dr. Renate Ebersbach, entretien du 15 avril 2008).

<sup>62</sup>Bellwald, 1992, p.166-169.

<sup>63</sup>Bagolini *et al.*, 1995, p.4-8; 47-52 ; Lippert, 1992, p.249-251.

son mémoire de diplôme, testé les outils adaptés au travail dans la glace. Elle a notamment travaillé à l'adaptation d'un *airbrush* pour la fonte localisée de la glace à l'approche d'un objet, méthode qui limite les risques d'altération accidentelle.

## 2.2 Constitution des matériaux organiques – quelques généralités

Avant d'aborder la préservation / dégradation des matériaux organiques pris dans la glace, il me paraît nécessaire de préciser la nature et composition des substances organiques. Bien que seuls les artefacts constitués de matériaux d'origine biologique soient considérés dans ce travail, la variété de formes que comporte cet ensemble est énorme : plantes, bois, graines ou fruits, os, cornes et andouillers, peaux, fourrures et cuirs, textiles de fibres animales ou végétales, etc. En outre, les combinaisons possibles entre plusieurs de ces produits de base sont multiples. S'ajoute encore à ce large panel la diversité de traitements / modifications que peuvent subir les substances brutes. Il est impossible de détailler ici les compositions particulières des matériaux organiques, et je limite la description à certaines caractéristiques générales.

L'unité fondamentale des organismes vivants est la cellule, qui consiste premièrement en une membrane qui la délimite, et dont la structure différencie les cellules végétales, qui possèdent une *paroi cellulosique* des cellules animales. Au cours de leur développement, les cellules se spécialisent et s'organisent entre elles pour former des structures fonctionnelles, les *tissus* qui sont parfois incorporés dans une matrice extracellulaire. Les tissus sont généralement classés selon leurs fonctions ; dans le monde végétal, les principaux groupes sont les tissus fondamentaux (les parenchymes), de soutien, de revêtement (ou épiderme), de réserve et les tissus conducteur ; chez les animaux, on distingue notamment les tissus conjonctifs (peau, ligaments et tissus adipeux), musculaires, et de soutien (tissus cartilagineux et osseux)<sup>64</sup>.

Les substances organiques consistent principalement en des polymères naturels (ou biopolymères), macromolécules pouvant comprendre plusieurs milliers d'atomes, à base de carbone (*C*), d'hydrogène (*H*) et d'oxygène (*O*), et qui incorporent d'autres éléments dont l'azote (*N*), le phosphore (*P*) et le soufre (*S*) notamment. Ces macromolécules constituent la majeure partie de la matière vivante et appartiennent à l'une des quatre classes biologiques que sont : les glucides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques<sup>65</sup>.

En termes généraux, les substances végétales sont des polysaccharides, dont la cellulose est la plus courante (près de 50% de la biomasse) ; les produits animaux sont principalement constitués de protéines, polymères des acides aminés, et qui représentent environ 50% du poids sec de la plupart des cellules. Les autres substances organiques associées aux produits végétaux et animaux sont les résines, les cires, les huiles et les graisses<sup>66</sup>.

---

<sup>64</sup>de La Baume, 1990, p.323 ; Miram et Sharf, 1998, p.21-25 ; Goffer, 2007, p.262-263.

<sup>65</sup>Regert et Rolando, 1996, p.119 ; Logan *et al.*, 2001, p.138 ; Goffer, 2007, p.266-270.

<sup>66</sup>Miram et Sharf, 1998, p.21-25 ; Logan *et al.*, 2001, p.138 ; Goffer, 2007, 270.

### 2.2.1 Les polysaccharides

La classe des glucides, ou *hydrates de carbone*, regroupe les substances naturelles produites par la photosynthèse et essentiellement basées sur trois éléments : le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, selon un ratio approximatif de 1–2–1. Les monosaccharides sont les monomères des polysaccharides : il s'agit de sucres divers, à base de 4 à 6 carbones, dont le glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ) notamment.

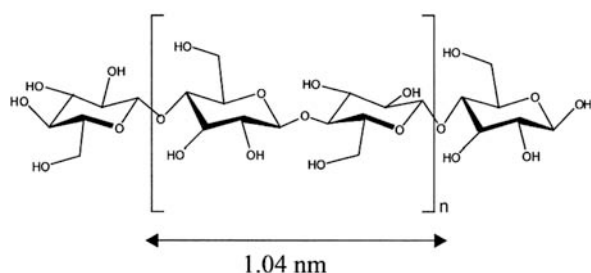


FIG. 13 – *Structure primaire de la cellulose : répétition des unités de  $\beta(1-4)$  cellobiose, elle-même composée de deux molécules de glucose.*

La cellulose est le composant structurel majeur des parois celluliques des plantes [FIG. 13]. Par son édification en fibres élémentaires (composées de l'association de plusieurs dizaines de chaînes de cellulose), puis en microfibrilles, fibrilles et fibres, et en association avec d'autres polysaccharides dont l'hémicellulose, elle confère aux végétaux structure et rigidité. Les microfibrilles de cellulose comportent des zones cristallines, où les fibres élémentaires sont orientées parallèlement et maintenues entre elles par des liaisons hydrogènes, et des zones amorphes, moins organisées.

Les propriétés physiques d'un matériau végétal particulier résultent pour une grande part de l'organisation (espacements, orientations, recouvrements) des microfibrilles de cellulose. Dans les bois, le troisième composant majeur des tissus est la lignine, qui est un polyphénol réticulé à base de composés aromatiques<sup>67</sup>.

### 2.2.2 Les protéines

Bien que les protéines prennent de multiples formes et occupent des fonctions biologiques extrêmement variées, elles sont fabriquées à partir d'un nombre limité d'unités chimiques, les acides aminés (ou amino-acides). Ces derniers sont essentiellement constitués de quatre éléments chimiques : *C*, *H*, *O* et *N* dans une configuration précise et dotées d'un radical (*R*), chaîne latérale qui caractérise chacun d'entre eux. La formation des protéines se fait par liaison peptidique qui est une polycondensation [FIG. 14]<sup>68</sup>.

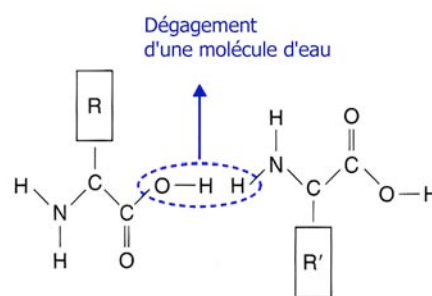


FIG. 14 – *Liaison peptidique : condensation de deux acides aminés.*

<sup>67</sup>de La Baume, 1990, p.223-224 ; Kronkright, 1990, p.146-147 ; Hart et Conia, 2002, p.237 ; 395 ; Fratzl, 2003, p.32-33 ; Allsopp *et al.*, 2004, p.11 Goffer, 2007, p.289.

<sup>68</sup>Mills et White, 1994, p.7;84 ; Hart et Conia, 2002, p.426. Haines, 2006b, p.5.

Le collagène et la kératine sont deux exemples de protéines fibreuses structurales. Le premier compose les tissus conjonctifs tels que la peau ou les ligaments et constitue la principale substance organique des os. La kératine est à la base des poils, plumes, ongles et cornes. Elle est plus dure que le collagène en raison de son haut degré de liaisons intermoléculaires di-sulphures entre les chaînes protéiques qui la composent<sup>69</sup>.

La structure primaire se définit comme la séquence des acides aminés dans la chaîne polymérique. La structure secondaire est la configuration spatiale d'une macromolécule et découle de la structure I. La structure tertiaire définit l'association de plusieurs protéines qui peut par exemple être hélicoïdale : le tropocollagène est une triple hélice de collagène, tout comme l' $\alpha$ -kératine, qui compose les poils des mammifères. Une autre configuration possible est dite "en feuillets", comme dans la  $\beta$ -kératine, que l'on retrouve dans les plumes des oiseaux ou les écailles des reptiles. La structure III est en partie maintenue par des liaisons hydrogènes, ou stabilisée par des liaisons covalentes, comme les ponts di-sulphures de la kératine, qui se forment entre des acides aminés dont les radicaux contiennent du soufre (cystéine principalement).

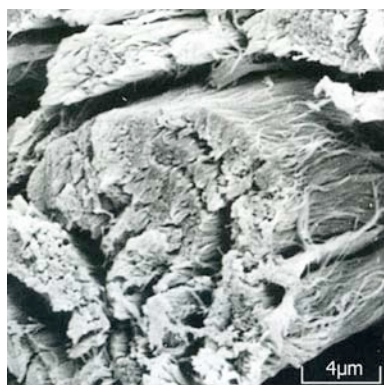


FIG. 15 – Fibrilles de collagène réunies en paquets.

Au niveau supérieur, les molécules s'alignent en grand nombre pour former les fibrilles, elles-mêmes agencées en paquets : les fibres de collagène [FIG. 15]. La présence de structures pseudo-cristallines à l'intérieur des faisceaux de fibrilles et l'organisation structurale à différents niveaux, confère au collagène une relative stabilité<sup>70</sup>.

### 2.2.3 Les lipides

La classe des lipides regroupe les huiles, les graisses et les cires, substances hydrophobes stockées en tant que réserve énergétique aussi bien dans les cellules animales que végétales. Associés en couches, les triglycérides constituent également les membranes cellulaires. Les graisses et les huiles sont des tri-esters du glycérol, soit des molécules composées de trois acides gras associés à une molécule de glycérol, qui est un alcool. Un acide gras consiste en une chaîne hydrocarbonée (comprenant généralement entre 16 et 22 atomes de carbone), présentant une fonction carboxylique ( $-COOH$ ) à une des ses extrémités, et par laquelle il se lie à l'un des groupes hydroxyles ( $-OH$ ) du glycérol (liaison ester). Les cires se distinguent des huiles et graisses par le fait qu'elles sont des mono-ester<sup>71</sup>.

### 2.2.4 Les biominéraux

Les substances organiques ne sont pas les seules créées par les processus biologiques : certaines substances inorganiques telles que l'hydroxyapatite ( $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ) des os, l'émail et la dentine de l'ivoire et des dents, ou encore les coquilles d'oeuf et les exosquelettes des mollusques font partie intégrante des matières biologiques. L'os est

<sup>69</sup>Mills et White, 1994, p.85 ; Wilson *et al.*, 2001, p.119.

<sup>70</sup>Williams *et al.*, 1995, p.107 ; Florian, 2006, p.43 ; Miram et Sharf, 1998, p.35 ; Hart et Conia, 2002, p.438-459 ; Haines, 2006b, p.11-13.

<sup>71</sup>Miram et Sharf, 1998, p.37 ; Hart et Conia, 2002, p.336 ; 448 ; Goffer, 2007, p.312.

un matériau composite où des minéraux sont déposés au cours de la croissance dans et autour d'un réseau complexe de fibres protéiques<sup>72</sup>.

Ce trop bref aperçu de quelques substances organiques est extrêmement réducteur et plusieurs commentaires s'imposent ici : les polysaccharides ne sont pas l'apanage des seuls végétaux : on les retrouve également chez les autres organismes (chitine du squelette externe des insectes et crustacés et des parois cellulaires des champignons ; le glycogène est une substance "réserve" du monde animal, équivalent de l'amidon des plantes, etc.). De même, les protéines sont tout aussi essentielles aux plantes qu'au règne animal, ne serait-ce qu'au niveau des enzymes<sup>73</sup>. Si seuls quelques types de molécules sont abordées ici, c'est d'une part en raison de leur importance structurelle au sein d'un matériau, mais surtout parce qu'il s'agit là des principaux constituants des artefacts archéologiques, pour la réalisation desquels les hommes ont sélectionnés des matières fonctionnelles, souvent parmi les plus résistantes à la décomposition<sup>74</sup>.

Ce n'est pas seulement la variété de sources de matériaux organiques qui est large, mais également les types de matériaux obtenus, fabriqués ou façonnés à partir de ces matières premières : les matériaux organiques sont presque toujours modifiés pour leur emploi, avec, comme exemple classique, les tannages de la peau pour la production de cuir. Un des aspects de l'adaptation à l'usage des matières premières d'origine biologique inclut le contrôle de l'équilibre du contenu en eau<sup>75</sup>.

### 2.2.5 Eau et état hydrique

La plupart des matériaux organiques contiennent de l'eau dans leur structure : ils sont *hygroscopique*. Le contenu en eau de la matière *vivante* est maintenu par la pression osmotique des cellules : à la mort d'un organisme une première phase de dessiccation intervient, suite à laquelle la proportion en eau de la matière varie en réponse à l'humidité de l'environnement, présente dans l'atmosphère ou dans le milieu d'enfouissement. L'eau joue un rôle essentiel au niveau des propriétés mécaniques et dimensionnelles des matériaux<sup>76</sup>.

L'**état hydrique** d'un matériau peut être abordé de deux manières :

1. *La teneur en eau (EMC pour Equilibrium Moisture Content)* correspond au rapport entre poids humide / poids sec d'un matériau, et est exprimé par un pourcentage ;
2. *l'activité thermodynamique de l'eau ( $A_W$ , pour water activity)* indique la *disponibilité* de l'eau au sein d'un matériau pour les réactions chimiques et les organismes biologiques. Cette notion est utilisée dans l'industrie alimentaire et en microbiologie.

L'activité thermodynamique de l'eau est définie comme le quotient de la pression de vapeur au sein d'un produit sur la pression de vapeur à saturation et à même température. L' $A_W$  n'a pas d'unité et est compris entre 0 et 1. A

---

<sup>72</sup>Child, 1995, p.19 ; Logan *et al.*, 2001, p.138 ; Goffer, 2007, p.279-284.

<sup>73</sup>Miram et Sharf, 1998, p.37-39.

<sup>74</sup>Florian, 1987, p.21 ; Cronyn, 1990, p.241.

<sup>75</sup>Florian, 1987, p.21 ; Cronyn, 1990, p.238 ; 240 ; Logan *et al.*, 2001, p.138.

<sup>76</sup>Florian, 1987, p.21 ; Cronyn, 1990, p.238 ; de La Baume, 1990, p.235 ; Méric, 2000, p.25 ; 29.

équilibre avec l'environnement,  $A_W$  est équivalente aux centième de l'humidité relative de l'air (HR)<sup>77</sup> ; <sup>78</sup> :

$$HR : 0 - 100\% \quad \xleftrightarrow{A \text{ équilibre}} \quad A_W : 0.00 - 1.00$$

La relation entre *teneur en eau* et *activité de l'eau* n'est pas linéaire. L'*EMC* ne permet d'aborder l'état hydrique d'un matériau, soit les interactions entre les molécules d'eau et les molécules organiques à l'intérieur de celui-ci. On fait ainsi appel aux *courbes isothermes de sorption* [FIG. 16].

Une fraction de l'eau présente dans un matériau organique fait partie de sa constitution. Elle ne peut être évaporée et ne figure donc pas sur la courbe de sorption.

Dans la première zone du graphe, les molécules d'eau forment des liaisons hydrogènes avec celles du substrat, et notamment avec les fonctions hydroxyles. Cette fraction d'eau est dite *eau monocouche* ou *colloïdale* et joue le rôle essentiel de lubrifiant : elle confère leur souplesse à certains matériaux organiques (à base de collagène par exemple) en permettant le "glissement" / déplacement des molécules les unes sur les autres. Plus les molécules du substrat sont polaires (ou hydrophiles), plus forte est l'affinité avec les molécules d'eau.

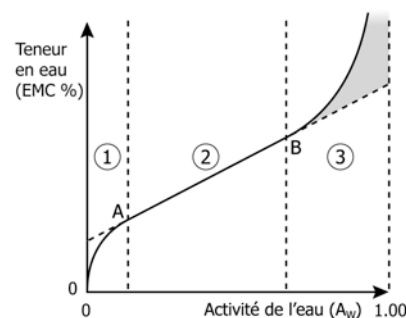


FIG. 16 – Courbe isotherme de sorption typique d'un matériau organique.

La zone centrale du graphe correspond à de l'*eau multi-couches* : les interactions entre les molécules d'eau se font par l'intermédiaire de l'eau monocouche, et leur force diminue proportionnellement à l'éloignement au substrat. L'activité de l'eau augmente ici linéairement avec la teneur en eau.

A partir du point d'inflexion B, apparaît l'*eau libre*, également nommée *eau "solvante"*, (représentée en grisé). Cette fraction d'eau est uniquement retenue par les forces capillaires, qui ne sont pas dépendante de la composition chimique mais de la structure du matériau (porosité / capillarité). Cette eau est la seule qui soit disponible pour les réactions biologiques propres au développement de micro-organismes<sup>79</sup>.

**HYSTÉRÉSIS.** Si un matériau organique (animal ou végétal) se trouve dans l'état hydrique de la zone 1 [FIG. 16], il aura perdu tout ou partie de sa souplesse, de sa résistance à la torsion / élancement et deviendra cassant. Il pourra présenter un rétrécissement et des fissurations. Cet état correspond également à un risque accru de réactions / affinités chimiques intermoléculaires. L'hystérésis se caractérise par la différence observée entre les courbes de sorption et désorption : la réhumidification d'un matériau ne suit pas exactement la courbe de désorption, en raison du rapprochement des macromolécules consécutif à la déshydratation<sup>80</sup>.

<sup>77</sup>L'humidité relative exprime la quantité de vapeur présente dans un volume d'air, à une température spécifique, en proportion à la quantité totale d'humidité que ce même volume pourrait contenir à saturation (Florian, 2006, p.42).

<sup>78</sup>Ltd, 2002, p.4 ; Guild et MacDonald, 2004, p.2 ; 8-9.

<sup>79</sup>de La Baume, 1990, p.235 ; Florian, 1997, p.126 ; Méric, 2000, p.29-31 ; Cahagnier, 2002, p.89-91.

<sup>80</sup>de La Baume, 1990, p.228 ; 233 ; Cronyn, 1990, p.243 ; Florian, 1997, p.9-10 ; Méric, 2000, p.31 ; Kronkright, 1990, p.149-151.

## 2.3 La glace comme milieu d'enfouissement – Préservation et dégradation

De même que la composition des matériaux organiques est abordée en termes généraux, les phénomènes de dégradation sont considérés ici de manière globale, sans entrer dans les détails des processus propres à un agent de détérioration, ou spécifiques à un matériau particulier. L'objectif principal est de *synthétiser* les caractéristiques du milieu d'enfouissement particulier que constitue la glace, les facteurs d'altération en présence ou susceptibles d'être réactivés, et les risques liés à la mise au jour des matériaux.

La dégradation des substances organiques résulte de causes à la fois diverses et interdépendantes : il s'agit d'un processus *multifactoriel*. On considère généralement que la dégradation dépend de : (i) la nature du matériau ; (ii) les conditions du milieu dans lequel il se trouve. Comme nous l'avons vu, la nature des matériaux organiques est variée : compositions chimiques, structures micro- et macroscopiques, modifications de la matière première, etc. Les conditions environnementales du milieu, et en archéologie, les conditions d'enfouissement plus particulièrement, incluent divers aspects dont : la chimie du milieu (présence / absence d'air, d'eau, acidité / alcalinité et concentration en diverses espèces chimiques) ; ses caractéristiques physiques (pression, température, lumière et surtout la stabilité / variabilité de ces paramètres) ; et l'activité biologique qu'il abrite.

On distingue ainsi les altérations physiques / mécaniques, les altérations chimiques et les altérations biologiques. Dans une étude comparative menée sur les conditions de conservation des collections d'histoire naturelle de mammifères naturalisés, Stephen L. Williams et Catharine A. Hawks ont illustré le caractère interdépendant des ces trois groupes d'altérations [FIG. 17]<sup>81</sup>.

De fait, la plupart des phénomènes de dégradation peuvent être abordés en termes de facteurs inhibiteurs. La préservation d'un matériau particulier, et *a fortiori* des substances organiques, résulte de l'inhibition des agents d'altération qui, en d'autres circonstances, en auraient entraîné la disparition<sup>82</sup>. C'est au travers du constat de la préservation des matériaux organiques dans la glace que les altérations des différents ordres (physique, chimique et biologique) sont présentées ici.

### 2.3.1 De l'eau solide...

Si l'eau peut infliger elle-même des altérations aux matériaux au travers de réactions chimiques (hydrolyse du collagène, libération des acides gras des lipides) ou physiques (érosion, tensions internes d'un matériau en réponse aux fluctuations de RH), elle est avant tout connue comme le "catalyseur universel" ou "solvant vital", indispensable à toute activité biologique : l'eau facilite la plupart des réactions chimiques et donc également enzymatiques<sup>83</sup>.

La glace constitue un milieu où l'eau est abondante, mais à l'état solide et donc indisponible pour l'activité biologique : dans une certaine mesure, on peut considérer que l'eau est "inactivée" voire même "absente" du milieu,

---

<sup>81</sup>Cronyn, 1990, p.14 ; de La Baume, 1990, p.235 ; Williams et Hawks, 1992.

<sup>82</sup>Cronyn, 1990, p.14 ; 17 ; 243

<sup>83</sup>Cronyn, 1990, p.18-19 ; Méric, 2000, p.25 ; Cahagnier, 2002, p.89 ; Florian, 2006, p.41.

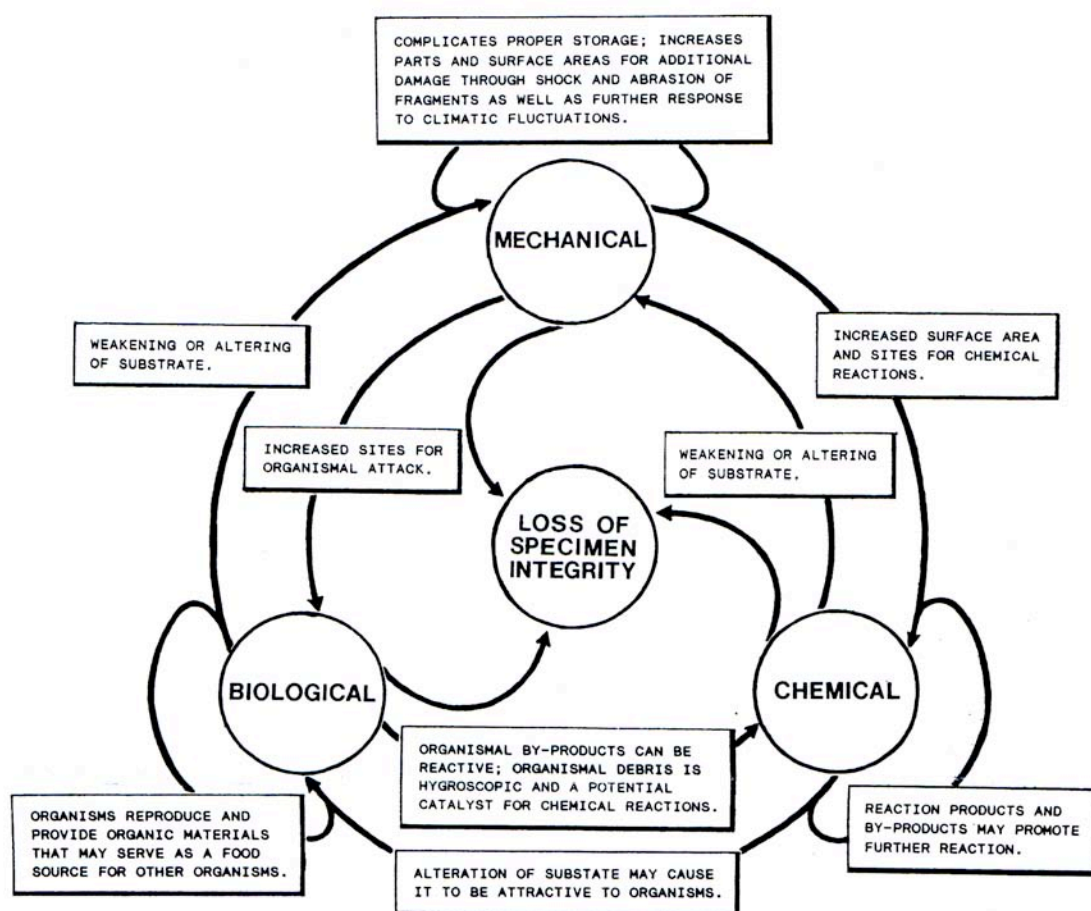


FIG. 17 – Schéma du caractère interdépendant des dégradations physiques, chimiques et biologiques.

et ce sans être perdue : les matériaux organiques ne subissent alors ni altérations chimiques, ni biologiques<sup>84</sup>. Si la présence même des matériaux organiques préservés dans une matrice de glace en constitue une preuve tangible, ce point de vue demande à être nuancé. Tout d'abord, la formation de glace à l'intérieur des matériaux ne dépend pas de la seule température mais également du type d'eau en présence (ou *état hydrique*, cf. point 2.2.5), des espèces chimiques diluées (ou de la pureté de l'eau) et de l'espace à disposition. Ces aspects ont des influences directes sur les altérations physiques, mais également de nombreuses implications sur la cinétique des réactions chimiques et sur l'activité biologique.

**FORMATIONS DES CRISTAUX DE GLACE.** Les dégradations mécaniques dues aux mouvements de la glace (pression, broyage) ont été introduites plus haut dans le texte au sujet de la dynamique des glaciers et nous ne reviendrons pas ici sur cet aspect. L'expansion volumique qui accompagne le passage de l'eau à l'état solide est importante (~ 9%) et exerce une force physique considérable en raison des quatre liaisons hydrogènes qui figent chacune des

<sup>84</sup>de La Baume, 1990, p.236 ; Cronyn, 1990, p.25 ; 243.



molécules d'eau dans le réseau cristallin de la glace<sup>85</sup>. Ce sont toutefois les cycles de gel / dégel qui sont ici reconnus comme les plus néfastes<sup>86</sup>.

La cristallisation de la glace est un phénomène relatif au temps comme aux températures : un refroidissement progressif conduit à la formation de cristaux de taille plus importante qu'une congélation subite, mais, sur la durée, les cristaux se réorganisent en polyèdres de tailles supérieures. Seulement, à des températures faiblement négatives, la glace ne se forme pas nécessairement à l'intérieur des matériaux. Selon M.-L. Florian, entre 0 et -4°C, seule une faible fraction de l'eau présente se trouve à l'état solide. Une des raisons en est que l'eau monocouche est déjà sollicitée : seules l'eau multi-couches faiblement liée et l'eau libre peuvent se figer en glace. L'espace disponible est également déterminant et le point de congélation est abaissé dans les structures fines : les pores ou capillaires de taille inférieure à 30µm ne permettent pas la formation de cristaux de glace<sup>87</sup>. Or, la température de la glace alpine n'est que légèrement inférieure à 0°C, généralement comprise entre -10 et 0°C, selon la saison<sup>88</sup>.

La littérature traitant des effets de la congélation sur les biens culturels est abondante, mais elle concerne principalement l'éradication des infestations biologiques par congélation choc (à des températures inférieures à celles de la glace alpine et sur des matériaux dont la teneur en eau est maintenue par des conditions muséales stables), ou la lyophilisation après imprégnation des matériaux organiques gorgés d'eau. Un consensus général semble établi quant à la relative innocuité des traitements de désinfestation par le froid, au regard du risque encouru par le développement de moisissures ou d'insectes<sup>89</sup>. Une extrapolation directe de ces données serait abusive en raison de l'inconnue que constitue l'état hydrique des matériaux dans la glace d'une part (cf. points 2.4.1 & 2.4.2), et des conditions particulières et contrôlées où sont menées ces opérations d'autre part (voir, par exemple : Carrlee 2003 ; Sym 1998 ou les différents ouvrages de M.-L. Florian).

**SUBLIMATION ET DESSICCATION.** Un processus pouvant intervenir à température négative est une déshydratation des réseaux capillaires par l'attraction qu'exerce sur l'eau (et sur la vapeur d'eau) la glace déjà formée. La dessiccation peut ainsi continuer à l'état gelé<sup>90</sup>. La sublimation peut extraire d'un matériau jusqu'à l'eau monocouche et causer ainsi la dénaturation des fibres de collagène, ce qui a notamment été observé sur les tissus conjonctifs d'Ötzi, présentant un arrangement extrêmement dense des fibrilles<sup>91</sup>.

Dans les milieux non totalement clos et à basse HR, comme c'est le cas de certaines momies du Groenland retrouvées dans des zones rocheuses (à la fois abritées de la pluie et avec un espace permettant un certain degré de ven-

---

<sup>85</sup>de La Baume, 1990, p.236 ; Cronyn, 1990, p.18 ; Florian, 1997, p.146.

<sup>86</sup>Peacock, 1999, p.16 ; Peacock, 2005, p.570.

<sup>87</sup>Michalski, 1996, p.11 ; Florian, 1997, p.82-83 ; 146-147, qui, pour la taille des capillaires se réfère à Horne, R.A., 1969, *Marine Chemistry*. Wiley-Interscience, New York ; Carrlee, 2003, p.144.

<sup>88</sup>Egarter-Vigl, 2006, p.48 ; Obleitner et Lehning, 2004, p.29-30.

<sup>89</sup>Williams *et al.*, 1995, p.107.

<sup>90</sup>Michalski, 1996, p.11 ; Florian, 1997, p.82.

<sup>91</sup>Hess *et al.*, 1998, p.524 ; Florian, 2006, p.42.

tilation) un processus de momification naturelle peut intervenir.<sup>92</sup> Les hypothèses / déductions quant aux mécanismes ayant abouti à l'actuel état de préservation d'Ötzi supposent également une ou plusieurs phases d'exposition à l'air libre<sup>93</sup>.

Dans l'industrie alimentaire, ce phénomène est notamment connu sous la dénomination de "*freezer burn*" de la viande. La principale manière d'en limiter l'effet consiste à réduire au minimum l'espace entre un aliment et son emballage<sup>94</sup>. Il semble possible de présumer ici qu'une matrice de glace prodigue, dans une certaine mesure, une "protection" similaire.

### 2.3.2 Altérations chimiques

Deux des principaux mécanismes de dégradation chimique non spécifiquement (mais également) liés à l'activité biologique altérant les matériaux organiques sont l'oxydation et l'hydrolyse. L'importance de ces réactions dépend de nombreux paramètres tels que l'humidité et les sels en présence (et donc le pH du milieu), la disponibilité en oxygène et la température. La conséquence première des dégradations de cet ordre est la dépolymérisation, qui consiste en la rupture des biopolymères en unités de tailles inférieures et qui peut, dans des cas extrêmes, aboutir à la solubilisation des sous-produits<sup>95</sup>.

Les zones amorphes constituent les lieux de dégradation chimique préférentielle : les structures pseudo-cristallines confèrent une certaine stabilité où l'intime association des macromolécules empêche l'accès des agents de dégradation chimiques. De manière générale, les sous-produits réagissent plus rapidement que les polymères dont ils proviennent. De plus, ceux-ci peuvent à leur tour provoquer de nouvelles réactions tout comme exercer une attraction sur les organismes colonisateurs<sup>96</sup>.

TEMPÉRATURE. La température joue un rôle significatif dans la cinétique de la plupart des réactions chimiques, dont le taux double pour chaque 10°C. La raison en est l'énergie cinétique qui augmente le taux de collisions entre les molécules adjacentes<sup>97</sup>. Toutefois, cette règle subit des exceptions notables : des études ont montré que l'auto-oxydation des lipides est plus importante à -20°C qu'à 0°C<sup>98</sup>.

---

<sup>92</sup>Hansen *et al.*, 1991, p.50-51

<sup>93</sup>Capasso *et al.*, 1992, p.212 ; Egarter-Vigl, 2006, p.47.

<sup>94</sup>Ltd, 2002, p.10.

<sup>95</sup>de La Baume, 1990, p.236-237 ; Cronyn, 1990, p.18 ; 243 ; Williams et Hawks, 1992, p.740.

<sup>96</sup>de La Baume, 1990, p.236-237 ; Cronyn, 1990, p.18 ; 243 ; Florian, 2006, p.43.

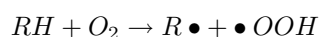
<sup>97</sup>Weintraub et Wolf, 1995, p.123 ; Carrlee, 2003, p.150 ; Florian, 2006, p.41

<sup>98</sup>Florian, 1997, p.126, qui se réfère à Poulsen, K.R. and Lindelov, F., Acceleration of chemical reactions due to freezing. In Rockland L.B., and Stewart G.F. (Eds.), *Water Activity Influences on Food Quality*. Academic Press, New York, 1975, p.650-678.

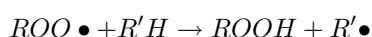
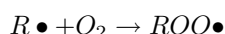
EFFET DE CONCENTRATION. Lorsqu'une solution aqueuse gèle, l'eau prise en glace se sépare de la mixture et la concentration en différentes espèces chimiques (les solutés) augmente (la dessiccation a un effet identique). Cela peut avoir des effets sur le pH et augmenter ainsi les cinétiques des réactions chimiques<sup>99</sup>.

Si les solutés en présence au sein d'un matériau dépendent essentiellement de sa nature et de son vécu, le pH de la glace d'altitude doit être légèrement acide<sup>100</sup>, (bien que la notion de pH ne soit pas particulièrement pertinente pour la glace). La glace se forme à partir des précipitations neigeuses et l'eau de pluie possède généralement un pH compris entre 5 et 6<sup>101</sup>. Il est par ailleurs déconseillé de boire l'eau de fonte des glaciers, très pauvre en minéraux. C'est peut-être là un des facteurs ayant participé à la dégradation observée sur le mobilier osseux du Schnidejoch : la déminéralisation des os intervient en milieu acide (dès un  $\text{pH} \leq 5$ ) et est favorisée par une faible concentration en minéraux<sup>102</sup>. Toutefois, les cycles de gel / dégel et humidification / dessiccation peuvent expliquer à eux seuls l'état constaté.

OXYDATION. Oxydation et réduction interviennent simultanément (réactions redox) et la définition en est le transfert d'électrons entre atomes (la molécule oxydée perd un électron). La plupart des réactions redox impliquent des radicaux libres ( $R \bullet$ ) en tant qu'intermédiaires, groupes chimiques hautement réactifs du fait qu'ils possèdent un électron non-apparié<sup>103</sup>. Le collagène est plutôt résistant à l'oxydation, mais la présence d'huiles ou de graisses, dans les cuirs semi-tannés notamment, peut jouer le rôle de catalyseur par la formation de radicaux libres sur les acides gras insaturés (double-liaison  $C = C$  au sein de la chaîne hydrocarbonée). L'oxygène initie la réaction en attaquant une liaison  $C - H$  :



Par la propagation, les radicaux libres peuvent ensuite détériorer les protéines.



C'est là un exemple de mécanisme d'altération chimique n'impliquant pas l'action d'enzymes. A relever que les radiations ultraviolettes de la lumière peuvent également initier ce type de réaction. D'après M.-L. Florian l'oxydation constitue l'un des facteurs majeurs de dégradation du complexe collagène / tannins, et peut-être même des matériaux organiques en général, en raison de la grande diversité de sources potentielles de radicaux libres<sup>104</sup>.

HYDROLYSE. L'hydrolyse consiste en la scission de liaisons covalentes par les ions hydronium ( $H_3O^+$  et  $OH^-$ ), toujours contenus en certaine proportion dans un milieu aqueux : on distingue ainsi hydrolyse acide et alcaline. Elle

<sup>99</sup>Florian, 1997, p.147 ; Carrlee, 2003, p.144.

<sup>100</sup>Malheureusement non testé sur le site du Schnidejoch.

<sup>101</sup>Brown, 2002, p.872 ; Goffer, 2007, p.225.

<sup>102</sup>O'Connor, 1987, p.7 ; Child, 1995, p.21.

<sup>103</sup>Florian, 2006, p.38.

<sup>104</sup>Zuppiroli et Bussac, 2001, p.360-361 ; Egarter-Vigl, 2006, p.50 ; Florian, 2006, p.37-39 ; 51.

entraîne la perte de l'intégrité structurelle polymérique : les liaisons peptidiques ( $C - N$ ) du collagène comme celles des polysaccharides ( $C - O - C$ ) sont susceptibles d'être rompues par hydrolyse. La cinétique de l'hydrolyse est influencée par le pH, les extrêmes étant favorables.

L'hydrolyse est l'un des principaux facteurs de dégradation chimique des protéines, mais ses conséquences sur les matériaux d'origine végétale semblent moins directes : à température et pression normales, l'eau seule n'a que peu d'effet sur la cellulose et les conséquences du pH sur le bois dépendent de l'essence. De manière générale, une atmosphère oxydante est plus néfaste au bois que les réductrices ; les milieux alcalins, plus que les acides. Les bases participent à la fois à la dégradation de l'hémicellulose et de la lignine<sup>105</sup>.

Il peut paraître vain de discuter la dégradation chimique dans une matrice de glace : les températures y sont basses, l'eau en partie indisponible et le milieu peut vraisemblablement être considéré comme anaérobie. Par ailleurs, c'est passer à côté d'une part importante du problème : l'altération chimique des matériaux organiques est également l'oeuvre des micro-organismes et de leurs enzymes.

### 2.3.3 Altérations biologiques

Il s'agit là de la principale cause de disparition des matériaux organiques... dans d'autres milieux que la glace. Nous n'allons évidemment pas entrer ici dans les processus taphonomiques (autolyse ; succession d'escouades de divers organismes et micro-organismes ; etc.) qui accompagnent la mort (puis l'abandon dans une perspective archéologique) de la matière biologique : la biodétérioration doit être tenue pour la norme dont l'exception est la préservation des matériaux organiques. Il est toutefois essentiel d'appréhender ici la manière dont les organismes sont eux-mêmes affectés par l'environnement, que ce soit durant le temps d'enfouissement, ou après la mise au jour<sup>106</sup>.

A l'ADB, Sabine Brechbühl a pu observer le développement de moisissures sur quelques artefacts de bois lors de la première campagne de fouilles du Schnidejoch, et ce quelques jours après l'arrivée des artefacts au laboratoire. Une contamination plus généralisée de l'ensemble du mobilier ligneux a par la suite été constatée au laboratoire de Constance<sup>107</sup>. Nous allons donc nous concentrer ici sur les micro-organismes, bien que les organismes supérieurs, et les insectes notamment, soient également responsables d'une grande part de la biodétérioration<sup>108</sup>.

CLASSIFICATION GÉNÉRALE. La phylogénie des être vivants comprend trois grandes catégories d'organismes :

1. Les *Bacteria* désigne la plupart des bactéries communes ;

---

<sup>105</sup>Florian, 1987, p.26-28 ; Mills et White, 1994, p.84 ; Unger *et al.*, 2001, p.43 ; Kronkright, 1990, p.165-166 ; Egarter-Vigl, 2006, p.50 ; Florian, 2006, p.37-38 ; 43.

<sup>106</sup>Cronyn, 1990, p.15 ; 24 ; 241 ; Child, 1995, p.21 ; Logan *et al.*, 2001, p.138 ; Allsopp *et al.*, 2004, p.6.

<sup>107</sup>Depuis, le laboratoire de l'ADB procède à la congélation des artefacts pour le stockage provisoire et le phénomène n'a plus été observé. (Sabine Brechbühl, synthèse de discussions.)

<sup>108</sup>Unger *et al.*, 2001, p.51-53 ; 58-59.

2. Les *Archaea* se compose des bactéries adaptées aux milieux extrêmes (très hautes températures ; forte concentration en sels) ;
3. Sous la dénomination d'*Eucarya* sont regroupés l'ensemble des animaux, plantes et champignons.

Les deux premiers ont une organisation cellulaire procaryote, sans noyau ni organites : il s'agit d'organismes unicellulaires. Les Eucarya peuvent être soit unicellulaires (levures notamment) soit pluricellulaires. Les moisissures appartiennent au règne des champignons et présentent une relative uniformité métabolique : ce sont des organismes aérobies à digestion externe. Certaines bactéries peuvent quant à elles se passer d'oxygène. Les relations existantes entre les différents micro-organismes sont extrêmement complexes : il peut y avoir symbiose, activité complémentaire ou concurrentielle comme inhibition (effet antibiotique) qu'il n'est nullement question d'étudier ici – pas plus d'ailleurs que les diverses classifications possibles à l'intérieur des catégories générales de *bactéries* et *moisissures*<sup>109</sup>.

MÉTABOLISME. Le principe général de la dégradation enzymatique consiste en la nécessité de réduire les molécules du substrat en une taille assimilable au travers des membranes cellulaires et des parois des *hyphes*, filaments ramifiés que développent les moisissures. Les micro-organismes peuvent dégrader la plupart des substances organiques, mais sont souvent spécialisés dans un type de nutriment. Le simple fait que la cellulose soit la substance organique la plus importante de la biomasse, indique qu'elle est attaquée par une grande variété de micro-organismes : l'hydrolyse enzymatique réduit les macromolécules de cellulose en glucose par les *cellulases*, classe d'enzymes dont les différents "membres" interviennent en étapes successives et complémentaires. Dans la plupart des environnements terrestres, la décomposition du bois par les moisissures est rapide et ce n'est que dans les milieux anaérobies que les bactéries y jouent un rôle prédominant<sup>110</sup>.

La glace ne constitue pas un environnement favorable au développement de micro-organismes. Toutefois, ceux-ci évoluent dans des conditions ambiantes très diverses. Ils sont omniprésents et parfois extrêmement résistants : des études ont montré que certaines bactéries survivent à une congélation de plusieurs dizaines de milliers d'années dans le permafrost et recouvrent leur activité physiologique dès la fonte du milieu<sup>111</sup>.

TEMPÉRATURE. La température est l'un des principaux paramètres régulateurs de l'activité des micro-organismes. Pour l'activité métabolique, soit la cinétique de développement des moisissures comme des bactéries, sont définies, pour chaque groupe ou espèce, une limite de température inférieure, une fourchette de températures optimales, ainsi qu'une limite supérieure. En règle générale, la germination des moisissures trouve sa limite inférieure entre 0 et 10°C, mais des moisissures (comme des bactéries) se sont révélées actives à des températures négatives. On considère la température de 4°C comme une moyenne valable dans une majorité de cas ; l'optimum de développement se situe

---

<sup>109</sup>Miram et Sharf, 1998, p.14-15; 424 ; Gobat *et al.*, 2003, p.32-33; 35 ; Guild et MacDonald, 2004, p.1.

<sup>110</sup>Florian, 1987, p.36; 45 ; Cronyn, 1990, p.263; 271 ; Blanchette, 2000, p.192 ; Unger *et al.*, 2001, p.51-53 ; Allsopp *et al.*, 2004, p.11-13 ; Guild et MacDonald, 2004, p.2 ; Florian, 2006, p.26.

<sup>111</sup>Gilichinsky, 1995, p.282-283 ; Cahagnier, 2002, p.89 ; Ltd, 2002, p.4 ; Guild et MacDonald, 2004, p.1 ; Peacock, 2005, p.570 ; Held *et al.*, 2005, p.51.

aux alentours de 15–20°C<sup>112</sup>.

**HUMIDITÉ ET OXYGÈNE.** L'oxygène joue un rôle direct dans la biodétérioration en déterminant à la fois l'extension de l'attaque et le type d'attaque possible. Le caractère anaérobie est un facteur clef de la préservation des matériaux organiques en général<sup>113</sup>. L'eau est le second paramètre régulateur : la figure 18 illustre le fait que tous les micro-organismes n'ont pas les mêmes exigences vis-à-vis du facteur hydratation. Ce paramètre est lié à la présence d'oxygène : un substrat saturé en eau devient anaérobie et seules certaines bactéries peuvent alors s'y développer<sup>114</sup>.

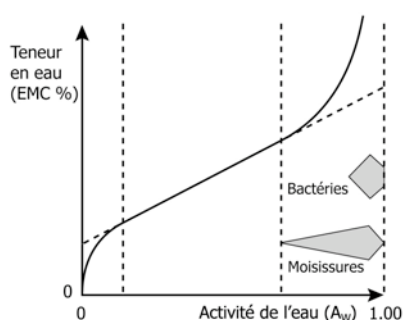


FIG. 18 – Zones d'action des micro-organismes en fonction de l' $A_W$ .

Un équilibre entre oxygène et humidité est crucial à l'activité des moisissures : la quantité d'eau dans les champignons est exprimée comme l'humidité contenue (abrégiée *MC* pour *Moisture Content*) et est calculée en pourcentage du poids sec. Ceux-ci nécessitent des  $A_W$  spécifiques de manière à pouvoir maintenir une *MC* cellulaire de l'ordre de 80–90%. Ainsi, la plupart des moisissures ne peuvent se développer dans un substrat dont l' $A_W$  est inférieure à 0.65 : en dessous de 0.70, les enzymes et protéines peuvent être altérées et l'ADN se dénature en dessous de 0.55. On considère ainsi la valeur de  $A_W = 0.70$ –0.75 comme limite inférieure de l'activation des moisissures. En dessous de 0.90, la plupart des bactéries ne vont pas montrer d'activité<sup>115</sup>.

**POTENTIEL HYDROGÈNE.** Le pH est également déterminant pour l'activité microbiologique, mais, les tolérances varient considérablement selon les espèces. L'activité des micro-organismes produit diverses substances dont des acides organiques, leur respiration du  $CO_2$  qui, à l'échelle de la matière, génère une multitude de micro-climats et influence les dynamiques de développement, positivement ou négativement. De manière générale, les milieux très acides inhibent le développement de micro-organismes, phénomène bien connu dans l'industrie alimentaire dont l'une des pratiques consiste à réduire le pH de nombreux aliments par des additifs tels que l'acide citrique. Les moisissures sont présumées préférer les environnements légèrement acides mais, dans l'ensemble, la tolérance des micro-organismes est extrêmement large<sup>116</sup>.

<sup>112</sup>Gilichinsky, 1995, p.281-282 ; Guild et MacDonald, 2004, p.2 ; Florian, 1997, p.90 ; 128-129.

<sup>113</sup>Cronyn, 1990, p.19 ; Strzelczyk *et al.*, 1997, p.301 ; Nilson, 1999, p.69.

<sup>114</sup>Florian, 1997, p.9 ; Cahagnier, 2002, p.90-93 ; Blanchette, 2000, p.192 ; 194.

<sup>115</sup>Cronyn, 1990, p.16 ; 242 ; Weintraub et Wolf, 1995, p.123 ; Florian, 1997, p.11 ; 125-127 ; Guild et MacDonald, 2004, p.2-3 ; 8-10

<sup>116</sup>de La Baume, 1990, p.238 ; Cronyn, 1990, p.20 ; 39 ; Child, 1995, p.21-22 ; Nilson, 1999, p.69 ; Ltd, 2002, p.4 ; Guild et MacDonald, 2004, p.4.

La température des glaciers alpins n'est que légèrement inférieure à 0°C et l'activité biologique y est très fortement réduite mais pas totalement inhibée. Il peut toujours y avoir présence d'eau liquide, et celle-ci peut être porteuse de micro-organismes actifs, même à -7°C<sup>117</sup>. Cependant, une matrice de glace constitue vraisemblablement un milieu proche de l'anaérobie ; il est en outre possible qu'elle assèche les matériaux par sublimation : en théorie, les principaux paramètres régulateurs du développement des micro-organismes se situent alors tous en dehors du champ d'activité.

### 2.3.4 Synthèse

De nombreux raccourcis quant aux différents mécanismes d'altération des matériaux organiques ont été empruntés : plusieurs pistes ont été introduites, mais aucune d'entre elles ne peut être considérée de manière indépendante. Encore une fois, la dégradation des matériaux organiques est un phénomène multifactoriel et, si certains types de dégradation peuvent se perpétuer d'eux-mêmes, il est plus fréquent qu'une forme particulière contribue à d'autres processus.

J'espère avant tout que ce passage aura permis au lecteur de se faire une première idée de la manière dont une matrice de glace constitue de multiples barrières aux différents agents de dégradation qui affectent les substances organiques en d'autres milieux. J'espère également qu'il aura permis une certaine sensibilisation au fait que plusieurs modifications doivent être envisagées suite à un séjour prolongé dans la glace. Il est important de constater ici que, dans bien des cas, les dégradations procèdent lentement et graduellement et ne seront visuellement détectables qu'à partir d'un stade déjà avancé<sup>118</sup>. Dans un article dédié aux matériaux archéologiques "périssables", J.A. Logan, M. Bilz, N.E. Binnie, T. Grant, D.W. Grattan, C.L. Newton et G.S. Young synthétisent cette idée par l'attaque du concept de "parfait état de préservation" :

« [...] "*Perfect preservation*", a term that usually refers to form rather than to intrinsic condition, is not possible. Objects made from organic materials suffer from various forms of degradation to various extents. The degree to which artifacts have degraded affects the risks associated with their excavation. Conservation of organic objects involves reducing risk at each stage of the object's history, from the time of excavation through treatment and storage. » (Logan et al., 2001, p.137.)

Si l'état de préservation des matériaux organiques issus de la glace peut être qualifié (sans abus de langage) d'exceptionnel, cela n'implique en rien que les artefacts soient "stables" au moment de leur découverte. L'enfouissement dans la glace constitue une forme d'intermède qui prend fin de manière subite au moment de la fonte.

## 2.4 Altérations post enfouissement

Sans qu'il ne soit nécessaire de revenir ici sur les différents types d'altérations, la conclusion évidente des sections précédentes est le *changement radical de milieu* que constitue la libération des artefacts de la matrice gelée dans un environnement qui leur est hostile :

- "Absence" d'eau → Eau en abondance et éventuellement suivie d'une brusque dessiccation ;

---

<sup>117</sup>Florian, 1997, p.146 ; Egarter-Vigl, 2006, p.48.

<sup>118</sup>Williams et Hawks, 1992, p.740 ; Williams, 1999, p.31.

- Milieu clos vraisemblablement proche de l'anaérobie → Air libre : vent, précipitations, lumière, etc.
- Conditions stables → Extrême variabilité de l'ensemble des paramètres, selon la météo alpine, connue comme "capricieuse" et des températures ambiantes pouvant "bondir" de plusieurs dizaines de degrés selon l'ensoleillement et le moment de la journée.

Il est intéressant de constater ici que les facteurs qui président à la fonte (précipitations ; températures élevées) vont infliger aux artefacts des stress parmi les plus importants. Aussi, les dégradations observées sur les matériaux issus de la glace sont pour la plupart imputables au laps de temps durant lequel un artefact a été soumis aux éléments entre le moment de sa libération et sa découverte<sup>119</sup>. Cela ne signifie pas qu'un objet n'ait, entre temps, jamais été exposé : il est probable que celui-ci ait émergé de la glace plusieurs fois au cours de périodes climatiques plus clémentes, avant d'être ré-enfouies sous la neige.

#### 2.4.1 Notes quant à la dynamique des objets dans la glace

Le phénomène de résurgence a pu se répéter plusieurs fois : les artefacts sont généralement exposés à la fin de l'été puis recouverts par les premières neiges. Les exemplaires les plus robustes peuvent ainsi avoir été exposés à l'air de nombreuses fois avant leur découverte par les chercheurs ; il est moins probable que des artefacts plus sensibles tels que les cuirs, les textiles ou les tendons survivent plus de quelques saisons au même traitement. Sur le Schnidejoch tous les artefacts en matériaux protéiques ont été découverts dans le banc de glace ou à sa proximité directe. Les bois et os ont quant à eux pu être retrouvés à des distances supérieures. Ces faits laissent supposer une couverture de glace / neige plus ou moins permanente pour les cinq derniers millénaires<sup>120</sup>.

Un autre aspect est que dans la grande majorité des cas, les artefacts ont été retrouvés non pas *dans* mais *sous* la glace [cf. FIG. 9 ; p.22]. Trois processus peuvent expliquer cet état de fait : (i) la fonte totale de la glace à un moment particulier ; (ii) la fonte de la couche par le fond ; (iii) une dynamique verticale des artefacts qui, de part les matériaux qui les composent, accumulent plus d'énergie que la glace dans laquelle ils s'enfonceraient progressivement<sup>121</sup>.

#### 2.4.2 Conditions de découverte

Dans le cas de matériaux organiques issus de la glace, l'état à la découverte est à différencier de l'état à la libération. A ce jour, les artefacts du Schnidejoch ont été retrouvés dans divers états hydriques : si la découverte coïncide avec l'émergence, les matériaux peuvent alors être plus ou moins humides / imbibés, en fonction de l'évacuation de l'eau de fonte dans le secteur particulier. A relever que l'eau de fonte peut ruisseler sur la glace et y creuser de profondes rigoles.

---

<sup>119</sup>VanderHoek *et al.*, 2007a, p.197, d'après : Monahan, Valery. Looking after Ice Patch Artifacts : Practical Strategies for the Recovery, Treatment and Storage of Archaeological Materials Recovered from Alpine Ice Patches. Papier présenté à l'occasion du 31<sup>st</sup> Annual Meeting of the Alaska Anthropological Association, Whitehorse, 2004. Non publié.

<sup>120</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.505 ; VanderHoek *et al.*, 2007a, p.197 ; Grosjean *et al.*, 2007, p.206.

<sup>121</sup>Dr. Albert Hafner, discussion du 6 décembre 2007.



Lorsque la découverte intervient plus tardivement, les objets peuvent alors être retrouvés dans un état de dessiccation avancée, que favorisent à la fois l'air sec, le vent et l'ensoleillement. Ces différents états ne sont pas antinomiques et, selon la taille d'un objet, une partie peut être encore piégée dans la glace, alors que d'autres sont immergées ou au contraire desséchées. Nous reviendrons sur cet aspect dans la quatrième partie de ce document.

## 2.5 Implications pour le conditionnement des artefacts

Dans un article sur la conservation *in situ* dans l'arctique canadien paru en 1987, C. Hett a relevé les objectifs fondamentaux et enjeux du conditionnement sur des sites gelés :

1. Eviter le séchage incontrôlé par le maintien de l'humidité contenue dans un matériau ;
2. Prévenir le développement de micro-organismes par un stockage à basse température.

Ceux-ci demeurent aujourd'hui parfaitement valables et constituent à la fois les deux problèmes majeurs et les mesures les plus appropriées pour y répondre. La plupart des articles concernant le conditionnement de tels artefacts soulignent également la nécessité de procéder *rapidement* à ces opérations<sup>122</sup> : ces objectifs constituent également deux des lignes directrices de mon travail. Il faut toutefois préciser quelques points : le premier concerne les objets très humides / gorgés d'eau pour lesquels le maintien de l'humidité est une option paradoxale au regard de la prévention du développement de micro-organismes. Le maintien des températures même légèrement supérieures à 0°C ne peut être considéré que comme une solution de stockage *provisoire*, avant traitement. Le seul avantage en est la *réduction* de la cinétique de développement des micro-organismes et non une solution à ce dernier<sup>123</sup>. Il n'est toutefois pas question d'autre chose ici.

Un deuxième point est que l'adjonction de biocides n'est aujourd'hui plus recommandée en raison du risque de contamination que constituent ceux-ci<sup>124</sup>. D'un point de vue théorique, deux alternatives peuvent être envisagées : (i) un stockage à l'état gelé ; (ii) la réalisation d'un micro-environnement anaérobie par l'emballage des artefacts. La première a notamment été utilisée par J. Vasquez pour le transport de blocs de terrain contenant du mobilier archéologique issu de zones de permafrost<sup>125</sup>. Cette technique présente des avantages indéniables mais, sur un site tel que le Schnidejoch, les artefacts ne sont plus gelés au moment de leur découverte : leur état hydrique a déjà pu fortement évoluer au cours de la fonte et une recongélation doit alors être menée dans des conditions optimales, non réalisables en montagne. De même, la seconde option pourrait être jugée idéale mais est d'emblée rejetée pour des questions de difficultés techniques de réalisation *in situ*.

HEALTH HAZARDS. Il existe un risque de santé lié à la manipulation d'artefacts exhumés de sols gelés. Des agents pathogènes, tout comme les micro-organismes en général, peuvent potentiellement survivre à l'enfouissement dans la glace. Par ailleurs, les matériaux en décomposition peuvent créer leurs propres toxines. Dans l'arctique, les

---

<sup>122</sup>Hett, 1987, p.67 ; Cronyn, 1990, p.5; 29-30; 244 ; Grant, 1993, p.5 ; Scott et Grant, 2006, p.4; 15; 20 ; Logan *et al.*, 2001, p.140.

<sup>123</sup>Florian, 1997, p.149.

<sup>124</sup>Cassman et Odegaard, 2007b, p105.

<sup>125</sup>Vasquez, 1999, p.13-14.

peaux imprégnées de graisses animales ont été identifiées comme source potentielle du botulisme ; les cas les plus fréquents semblent toutefois être de simples réactions cutanées dues à la fois à des allergies comme à la présence de moisissures. Si le sujet est peu étudié et un véritable danger non démontré, le risque potentiel est lié à l'ingestion d'agents pathogènes, qui peuvent facilement être transférés à la bouche par les mains (ou les cigarettes !). L'infection peut également résulter de coupures cutanées et, par mesure de précaution, il est fortement recommandé de porter des gants pour tout contact avec les artefacts ainsi que de les stocker à basse température aussi vite que possible<sup>126</sup>.

En parallèle aux réflexions théoriques, le travail réalisé pour l'ADB comporte de nombreux aspects pratiques qui demandent à être synthétisés. J'ai choisi de placer ces derniers dans des encadrés nommés *Conservation in situ (i-vi)* qui regroupent les mesures, précautions, options d'emballage, de protection et de conditionnement *sur le terrain*. Pour des questions d'uniformité, j'introduis ici le premier de ces encadrés pour l'objectif général du conditionnement *in situ*, du strict point de vue de la conservation préventive et, à ce stade, sans prendre en compte la *stabilité mécanique* d'un artefact :

### Conservation in situ (i) : objectif général

Les **risques principaux** pour les matériaux organiques issus de la glace sont :

1. Le **séchage incontrôlé** pouvant entraîner rétractation, fissurations, cassures, perte de souplesse / structure, etc.
2. La **prolifération de micro-organismes**, qui sont omniprésents et, une fois un objet "colonisé", excessivement difficiles à éliminer.

Les **mesures** fondamentales consistent à :

- **Maintenir l'hygrométrie d'un artefact ;**
- Endiguer le développement des micro-organismes ;
  - ↪ **Maintenir de basses températures.**

Les **bactéries** et **agents pathogènes** peuvent potentiellement survivre à l'enfouissement dans la glace :

- **Porter des gants** pour tout contact avec les artefacts est fortement recommandé.

---

<sup>126</sup>Hett, 1987, p.69 ; Scott et Grant, 2006, p.20 ; Logan *et al.*, 2001, p.141 ; Arriaza et Pfister, 2007, p.205-206.

### 3 Etudes et analyses scientifiques – mesures de sécurisation des indices

« *Because organic materials are usually small and fragile, if preserved, they often are decayed, represented only by remnant chemical, atomic, and molecular data of minimal size with compromised morphological integrity. While nothing can be done about materials that do not make it into the archaeological record, when remains are potentially present in a site, multiple field and laboratory techniques can be employed to recover representative samples of all sizes of material classes. A unique feature of well-preserved dry and wet [and frozen] sites is the preservation of information of all classes and sizes.* » (Dillehay, 2001, p.21.)

Cette partie de mon travail concerne le *potentiel d'analyse*<sup>127</sup> des matériaux organiques retrouvés dans la glace. L'exceptionnel état général de préservation constaté ouvre la voie à un vaste champ d'études et d'analyses scientifiques, toutes susceptibles d'apporter à l'archéologie des éléments de connaissance variés.

Il ne s'agit pas ici de chercher à définir ledit potentiel d'analyse, vision statique qui ne tiendrait pas compte de sa nature à la fois *contextuelle* (qui dépend d'un artefact et des indices qu'il renferme, au cas par cas) et *évolutive* (les études ou analyses réalisables reflétant un état de connaissance momentané), mais plutôt d'en souligner la variété, ainsi que de mettre en évidence les implications aux niveaux préliminaires que sont le choix de matériaux d'emballage, les conditions de stockage, et les mesures de manipulation à respecter. L'objectif général – et ambitieux – est d'éviter la réduction du potentiel d'analyse, que se soit par disparition, masquage ou invalidation des indices archéologiques. Comme le soulignent de nombreux auteurs, cet aspect de sécurisation des indices fait partie intégrante d'un projet de conservation abouti<sup>128</sup>.

En raison même de la diversité des indices archéologiques, tant dans leurs types que dans la manière dont ceux-ci peuvent être étudiés, il paraît illusoire de chercher ici à en dresser la liste, même partielle. Aussi ai-je choisi de procéder à une présentation sélective de quelques méthodes d'analyse auxquelles pourra faire appel l'archéologue<sup>129</sup>. La trame de fond est réalisée au travers de l'exemple de la jambière de pantalon néolithique découverte en 2004, qui illustre à lui seul la variété d'informations pouvant exceptionnellement être recherchées sur un seul artefact. S'agissant parfois d'études / analyses en cours, il n'est nullement question de présenter des résultats, mais les types d'indices poursuivis et les éventuels facteurs d'échec, pour en faire ressortir les *mesures de sécurisation* à respecter dès les premières étapes de découverte. Chaque analyse est présentée selon le schéma approximatif suivant :

---

<sup>127</sup>Par potentiel d'analyse, j'entends tout type d'étude, de l'examen visuel, typologique ou morphologique, à la chimie analytique (biochimique, moléculaire, élémentaire, isotopique, etc.), en passant par l'étude des microrestes (animaux ou végétaux), des résidus ou des éléments traces. Le potentiel d'analyse recouvre l'ensemble des indices archéologiques.

<sup>128</sup>Berducou, 1990, p.5-6; 25-26; Brooks *et al.*, 1996, p.16-17; 19; Chiotasso et Sarnelli, 1996, p.30; Fell, 1996, p.48; E.C.C.O., 2002, *Professional Guidelines (III)*, Article 9; Logan *et al.*, 2001, p.138.

<sup>129</sup>Pour des questions d'équilibre entre les différentes parties de ce document, certaines études et analyses ne sont pas même abordées, alors que d'autres, en raison des mesures particulières de sécurisation des données qu'elles impliquent ou de leur importance en contexte alpin, se retrouvent mises en évidence. Ces choix revêtent évidemment un caractère arbitraire, et ne reflètent pas leurs "poids" respectifs dans la compréhension d'un artefact (ou d'un site).

### Analyse type XXX

<b>Potentiel informatif</b>	[type(s) d'indice(s) recherché(s)] ;
<b>Principe général</b>	[brève description de la méthode] ;
<b>Facteurs d'échec potentiel</b>	[contamination des échantillons, mesures de stockage, précautions de manipulation, etc.].

Les description des analyses sont ici délibérément brèves, chacune des méthode pouvant elle-même faire l'oeuvre d'ouvrages spécialisés, parfois volumineux, et le lecteur pourra trouver dans la littérature citée les informations indispensables à la compréhension des méthodes introduites dans ce document.

## 3.1 Un col alpin comme contexte archéologique

Sur un site tel que le Schnidejoch, un artefact distinct ne peut pas toujours être compris sur le terrain. La perspective temporelle est limitée en raison du contexte particulier : qu'il soit retrouvé "dans", "sous", ou "à côté" du banc de glace, l'artefact est "isolé", sans structure ni stratigraphie qui permette de l'associer à un complexe. Il s'agit ici essentiellement d'objets *perdus* ou *abandonnés* lors de passage du col et l'une des questions fondamentales est d'en déterminer le moment<sup>130</sup>.

Au stade de la fouille dans un tel milieu, seules la morphologie d'un artefact et l'expérience de l'archéologue permettent d'avancer les premières hypothèses / déductions de datation. De plus, avant l'investigation d'un spécialiste (d'un type de matériau ou type d'artefacts), la *fonction* d'un objet / fragment pourra également constituer une inconnue : un examen poussé n'est pas toujours possible sur le terrain et plus rarement encore en contexte d'altitude. Aussi, est-il impossible de déterminer, *a priori*, que cette pièce de cuir [FIG. 19] est en fait une jambière de pantalon<sup>131</sup> ! ...du Néolithique récent<sup>132</sup> !



FIG. 19 – Jambière de pantalon néolithique – situation de découverte (2004).

<sup>130</sup>Dr. Albert Hafner, entretien du 06 décembre 2007.

<sup>131</sup>Détermination Marquita Volken, *Gentle Craft*, Lausanne ; Suter *et al.*, 2005a, p.512-514.

<sup>132</sup>Datation <sup>14</sup>C à l'*Institute for Theoretical Physics (ITP)* de l'*Eidgenössische Technische Hochschule(ETH)*, Höggerberg ; Suter *et al.*, 2005a, p.516.

### 3.1.1 Datation isotopique $^{14}\text{C}$ /AMS

La datation radiocarbone est la plus répandue des méthodes de datation dans la recherche archéologique. Développée à partir du milieu du 20<sup>e</sup> siècle, cette méthode permet la *datation absolue* de l'ensemble des substances organiques, qui contiennent toutes du carbone, dont une certaine proportion de carbone-14 (ou *radiocarbone*  $^{14}\text{C}$ ). Sur le site Lenk-Schnidejoch, les datations  $^{14}\text{C}$  réalisées comptent pour une grande part dans la compréhension générale du site en permettant la détermination de plusieurs périodes distinctes durant lesquelles le col a été emprunté<sup>133</sup>.

PRINCIPE GÉNÉRAL. La méthode se base sur la *désintégration radioactive* du  $^{14}\text{C}$  en  $^{14}\text{N}$ . Le  $^{14}\text{C}$  se forme dans la stratosphère où il est converti en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Par la photosynthèse, les végétaux incorporent le  $\text{CO}_2$ , qui se retrouve ensuite dans l'ensemble du règne animal via la chaîne alimentaire. En première approximation, tous les organismes *vivants* possèdent le même rapport  $^{14}\text{C}/(^{12}\text{C} + ^{13}\text{C})$ , ou  $\delta^{14}\text{C}$ . Lorsqu'une plante ou un animal meurt, l'apport de carbone – et donc de  $^{14}\text{C}$  – à son organisme cesse : c'est là le moment zéro que l'analyse radiocarbone permet de dater. La désintégration radioactive est un processus au taux constant et l'analyse du ratio  $\delta^{14}\text{C}$  reflète ainsi le laps de temps écoulé depuis la mort d'un organisme<sup>134</sup>.

Deux techniques principales sont utilisées : la méthode dite "conventionnelle", qui consiste à détecter et compter le montant de *rayonnement bêta* émis lors de la détérioration radioactive du  $^{14}\text{C}$ , par unité de temps et pour un poids connu ; et la technologie radiocarbone AMS (*accelerator mass spectroscopy*) basée sur le comptage (dans un spectromètre de masse couplé à un accélérateur de particules) de la quantité de  $^{14}\text{C}$  en proportion de celle des isotopes stables du carbone. La seconde méthode, introduite dans les années 1980, permet une réduction considérable du temps nécessaire à l'analyse, tout comme de la taille de l'échantillon<sup>135</sup>. Le prétraitement vise à éliminer les contaminants (soit le carbone moderne). L'échantillon purifié est ensuite converti en une forme homogène ( $\text{CO}_2$ , graphite ou benzène) qui puisse être analysée<sup>136</sup>.

NOTATION. Les datations carbone-14 sont reportées en terme d'années *before present* [BP] lequel est, par convention, fixé à l'an 1950. La notation conventionnelle des résultats est : [année]  $\pm$  [erreur] BP où l'erreur est la *déviati on standard* inhérente à la méthode, valeur statistique qui exprime la variabilité (ou probabilité) de la mesure. Les standards en sont  $1\sigma$  (68.2%) ou  $2\sigma$  (95.4%). Les années radiocarbone ne correspondent pas nécessairement aux années calendaires, en raison des variations du taux de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère notamment. Les résultats radiocarbone doivent ainsi être *calibrés* pour être traduits en un intervalle de temps ajusté à notre calendrier (ce qu'indique l'emploi du préfixe *cal.* BP). Ce traitement des données se fait au travers de *courbes de calibration*, elles-mêmes

---

<sup>133</sup>cf. point 1.1.3, p.17 ; voir plus particulièrement : Suter *et al.*, 2005a, p.516-522 ; et Grosjean *et al.*, 2007, p.204-206.

<sup>134</sup>Hedges, 2000, p.465-467 ; Taylor, 2000, p.3 ; Goffer, 2007, p.272-273.

<sup>135</sup>quelques dixièmes de grammes en théorie, contre plusieurs dizaines (voire centaines) de grammes pour la méthode "conventionnelle".

Toutefois, les quantités nécessaires varient fortement selon le matériau considéré et les protocoles de préparation des échantillons.

<sup>136</sup>Regert et Rolando, 1996, p.119 ; Hedges, 2000, p.468-471 ; 478-479 ; Goffer, 2007, p.279-280.

obtenues par datation carbone-14 d'échantillons de bois dont l'âge exact est déterminé par *dendrochronologie*<sup>137</sup>.

CONTAMINATION. Il faut distinguer ici deux types de pollution : les contaminants d'enfouissement et la contamination moderne. Certains sels solubles présents dans le milieu d'enfouissement (dont les carbonates) et la pénétration de racines de plantes au cours de l'enfouissement peuvent incorporer du carbone "ancien" ou "moderne" à un matériau. Le second type concerne les manipulations et pratiques de conservation-restauration. Les résines de consolidation, biocides ou autres composants organiques ainsi que l'insertion de fibres au cours d'un nettoyage, peuvent également fausser les résultats.

Bien que les opérations de prétraitement incluent la décontamination des échantillons (par abrasion des surfaces exposées et différents traitements chimiques successifs), certaines précautions restent nécessaires : l'idéal est d'éviter tout contact avec la peau humaine. L'entreposage des échantillons dans des containers de verre propres est optimal, mais une autre solution consiste à envelopper l'échantillon dans une feuille d'aluminium, puis dans un sachet PE à fermeture zip (type Minigrip®). Sauf cas extrêmes (échantillon de petite taille exposé au soleil), l'effet des plastifiants contenus dans les polymères du sachet est généralement trop faible pour influencer l'analyse<sup>138</sup>.

## 3.2 Une jambière de pantalon néolithique

### 3.2.1 Première phase : le nettoyage d'investigation

Les cuirs et textiles sont deux exemples de types d'artefacts qui peuvent demander à être remis en forme pour leur étude. Cette opération n'a rien d'anodin : située au croisement entre la recherche et la conservation, elle implique, selon la structure et la résistance mécanique d'un artefact particulier, un travail progressif qui passe par le contrôle de l'état hydrique pour ne pas exercer de contraintes que ne pourrait supporter la pièce. La situation idéale est lorsque l'investigation / étude et la conservation-restauration peuvent être effectuées en une seule étape, comme c'est le cas pour les cuirs qu'étudient et conservent Marquita et Serge Volken<sup>139</sup>.

L'investigation des peaux et cuirs aboutit généralement à un *dessin d'enregistrement* qui, selon des codes conventionnels, permet de représenter plusieurs des observations réalisées : forme de la pièce ; présence / types de coutures ; types d'assemblage entre plusieurs éléments ; fissures / craquelures / déformations (qui peuvent constituer des indices de tensions d'usure) ; etc. Idéalement, l'étude permet de déterminer : l'usage / fonction de la pièce ou du fragment de cuir ; l'espèce animale dont provient la dépouille par l'observation des caractéristiques de la peau ("grain", implantation pileuse, pores, épaisseur, etc.) ; le type de tannage réalisé que le spécialiste peut spécifier à partir de la texture / souplesse et de la teinte du cuir. Au final, l'ensemble de ces indices constitue un corpus typologique parfois attribuable à des époques ou périodes spécifiques<sup>140</sup>.

---

<sup>137</sup>Hedges, 2000, 480-487 ; Goffer, 2007, p.273-287.

<sup>138</sup>Hedges, 2000, 471 ; 492-493. ; Goffer, 2007, p.285.

<sup>139</sup>Laboratoire *Gentle Craft*, Lausanne.

<sup>140</sup>van Waateringe et Goedecker-Ciolek, 1992, p.410-421 ; Volken, 2005, p.38-40 ; Haines, 2006a, p.17 ; Cameron *et al.*, 2006, p.246-247 ; 254-255 ; Marquita Volken, synthèse de discussions.

Une majorité d'artefacts peuvent être compris par leur observation directe, sans qu'il soit nécessaire d'entreprendre d'autres analyses. Seulement, pour les peaux / cuirs anciens, surviennent plusieurs difficultés : le Néolithique est un moment clef de la différenciation entre espèces sauvages / domestiques et, dans le cas présent, les caractéristiques de la peau ne permettent pas d'en déterminer l'origine au-delà du genre. De plus, les procédés de tannage / semi-tannage néolithiques demeurent spéculatifs en raison de l'extrême rareté des découvertes réalisées à ce jour<sup>141</sup>.

MESURES DE SÉCURISATION DES INDICES. Au cours d'un premier entretien en mars 2007, Marquita et Serge Volken m'ont précisé les mesures qu'ils attendent pour les artefacts qui leur sont confiés. Il s'agit des prescriptions déjà soulignées dans la partie précédente de ce document (à savoir : maintien de l'hygrométrie ; rapidité de transmission ; proscription de produit chimique) auxquelles s'ajoutent deux impératifs :

1. **Ne pas procéder au nettoyage des artefacts** : ce qui, pour les sites "terrestres", signifie apporter la pièce de cuir et / dans la terre en contact ;
2. **Ne pas ouvrir / déplier / perturber un fragment de cuir** : selon son état de préservation, un cuir pourra être fragile et les tranches, qui contiennent une grande part des indices technologiques / typologiques, peuvent se fragmenter : dans certains cas, il ne sera plus possible de retrouver la connexion, ce qui équivaut à la perte de l'information. Par ailleurs, les cuirs peuvent piéger dans leur structure divers indices (poils, pollen, insectes, fibres diverses, etc.) pour lesquelles l'ouverture d'une pièce peut entraîner une incertitude de la source / provenance, et donc l'invalidation des résultats.

Ces deux points sont évidemment liés : le nettoyage d'investigation doit être mené dans des conditions adéquates, par un spécialiste qui saura identifier, enregistrer et sécuriser les indices potentiels, ce qui ne peut se faire sans la compréhension simultanée de l'artefact. Il s'agit d'une opération de laboratoire, non de terrain.

### 3.2.2 Fibres végétales et animales

Un aspect technologique de l'utilisation des cuirs est la couture des pièces, qui peut être effectuée au moyen de fibres animales ou végétales. Il est également possible que tous les poils d'une peau n'aient pas été éliminés lors de l'ébourrage<sup>142</sup>. Enfin, des poils, cheveux ou des fibres végétales peuvent se retrouver à la surface d'une pièce de cuir, piégés dans sa structure fibreuse. L'ADB confie les textiles archéologiques et les échantillons de fibres au Dr. Antoinette Rast-Eicher<sup>143</sup> en vue de l'étude technologique et de la détermination de l'origine biologique des fibres.

---

<sup>141</sup>van Waateringe *et al.*, 1999, p.884 ; Marquita Volken, synthèse de discussions.

<sup>142</sup>Opération mécanique qui consiste à éliminer les poils et résidus épidermiques (Volken, 2005, p.106).

<sup>143</sup>laboratoire Archeotex à Ennenda (GL).

PRINCIPE GÉNÉRAL. La détermination des fibres consiste en un examen morphologique et anatomique des fibres / poils (structure superficielle ; torsion ; diamètre ; section ; etc.). Les méthodes de prélèvement et préparation de l'échantillon peuvent être relativement spécifiques selon le matériau à observer, en raison de l'axe de vue recherché notamment. Une coloration chimique est éventuellement réalisée, pour la mise en évidence de certains composants (marquage) ou pour l'optimisation du contraste. L'observation est en règle générale réalisée sous microscopie optique en champ clair (transmission de lumière blanche) ou sous lumière polarisée. Parfois, une observation par microscope électronique à balayage (MEB) peut apporter des informations complémentaires, lorsqu'il s'agit par exemple de déterminer les caractéristiques superficielles d'un poil (agencement des plaques de la cuticule). Une description moins succincte de la méthode pourra se trouver dans le chapitre "*Identification of Plant and Animal Materials in Artifacts*", dans Florian *et al.*, 1990, qui constitue une excellente approche didactique de la préparation et observation de différents types d'échantillons.

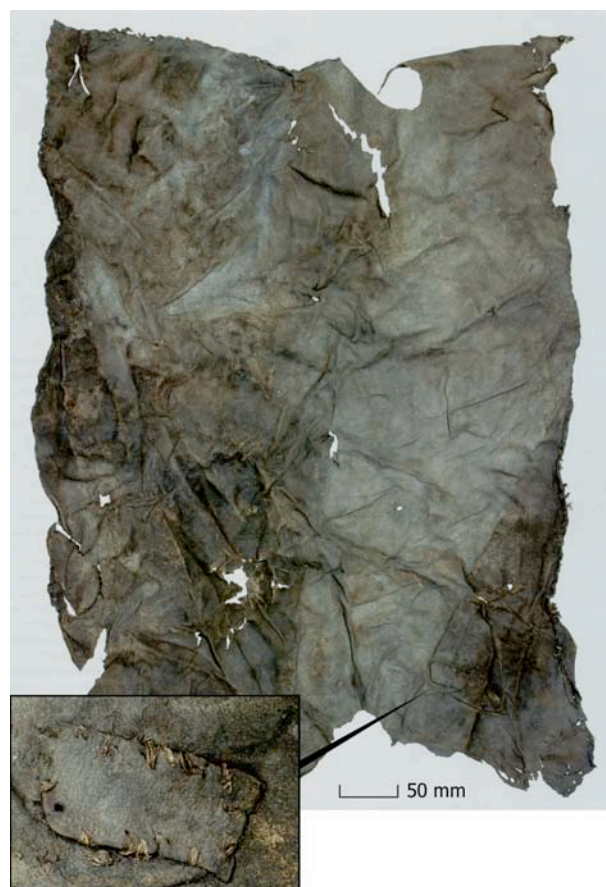


FIG. 20 – Jambière de pantalon – Détail de coutures (fibres de tilleul).

PROBLÈMES POTENTIELS. Outre la pollution par des fibres animales (et humaines) ou végétales modernes (pouvant provenir de l'équipe de fouille comme de ses vêtements), Antoinette Rast-Eicher souligne elle aussi la nécessité de conserver l'humidité des artefacts et le risque de développement de moisissures, qui est un problème majeur pour l'étude et la préservation à moyen-long terme des textiles. Pour de tels artefacts, un autre problème soulevé est le fait qu'un simple Minigrip® ne constitue pas une solution d'emballage adéquate du fait du manque de rigidité [cf. FIG. 5, p.16] : un support physique est souvent indispensable. Enfin, Antoinette Rast-Eicher demande également à ce que les artefacts lui soient transmis le plus rapidement possible<sup>144</sup>.

A relever ici que le Dr. Werner Schoch<sup>145</sup>, chargé de la détermination des essences du mobilier ligneux pour l'ADB (étude qui repose également sur un examen morphologique par microscopie optique)<sup>146</sup> considère également les moisissures comme l'une des principales difficultés. Cependant, ce spécialiste signale l'excellent état de préservation

<sup>144</sup>Dr. Antoinette Rast-Eicher, courrier électronique du 17 juillet 2007.

<sup>145</sup>Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf (ZH).

<sup>146</sup>Schoch *et al.*, 2004.



au niveau de la structure cellulaire de l'ensemble des bois du site du Schnidejoch, et donc la relative stabilité des artefacts<sup>147</sup>. Le Dr. Christoph Brombacher, à qui est confiée l'analyse des restes botaniques et prélèvements de sédiments<sup>148</sup>, précise que les microrestes organiques non carbonisés ne doivent en aucun sécher : un stockage à l'abri de la lumière à des températures de l'ordre de 4-5°C constitue une solution appropriée, même si, à long terme, un stockage à l'état gelé est préférable<sup>149</sup>.

### 3.2.3 Les pollens

La palynologie est l'étude des pollens, grains et spores fossiles : il s'agit d'une des méthodes les plus souvent mises à contribution par l'archéologie pour la reconstitution du couvert végétal, l'étude des climats du passé et l'impact de l'homme sur son environnement. Ce ne sont toutefois pas ces aspects qui intéressent ici les chercheurs, mais les informations potentielles révélées par la présence de pollens au sein de la structure du cuir<sup>150</sup>.

PRINCIPE GÉNÉRAL. Les *pollens* sont les éléments reproducteurs mâles des plantes à fleurs : on parle d'anémogamie lorsque ceux-ci sont transportés par le vent, d'entomogamie lorsque les insectes sont les vecteurs de la fécondation. Les *spores* sont produites par les champignons, algues, mousses et sphaignes pour la reproduction et la dissémination. Ces derniers sont généralement d'importance numérique bien moindre que les pollens. L'enveloppe des pollens, l'*exine*, présente une morphologie (forme, taille, structure de la paroi, nombre et répartition des *apertures* ou "ouvertures" sur la surface, etc.) qui distingue entre elles les espèces végétales. L'exine est de composition chimique relativement stable, ce qui permet de retrouver les enveloppes des pollens conservées dans de nombreux milieux.

En règle générale, une analyse est réalisée à partir de coupes stratigraphiques de sédiment, mais parfois, un matériau ou un contexte particulier peut faire l'objet d'une analyse ciblée (contenu d'une céramique par exemple). Les opérations préliminaires consistent en la concentration du matériel sporo-pollinique, par dissolution chimique de la matrice de sédiment. L'analyse s'effectue ensuite sous microscope optique, par détermination et comptage des grains. L'interprétation des résultats se base sur la connaissance de la production et dispersion de pollens des végétaux actuels. Elle répond à une méthodologie stricte qui implique, selon les cas, la présence de différents *taxons* (groupes de classification : famille ; genre ; espèce) pour permettre une reconstitution du couvert végétal statistiquement valable<sup>151</sup>.

Dans le contexte d'un col alpin, la palynologie pourra éventuellement participer à la détermination de la provenance d'une pièce (si le contenu pollinique s'avère à la fois exempt de toute contamination et caractéristique de la végétation d'une région donnée<sup>152</sup>), mais elle peut également fournir des informations d'ordre technologique : les analyses réalisées sur les vêtements de cuir d'Ötzi ont dévoilé la présence de pollens de taille de près de deux fois inférieure à la normale, caractérisés de plus par l'absence de teinte après préparation. Des essais pour en déterminer

---

<sup>147</sup>Dr. Werner Schoch, discussion du 27 juillet 2007.

<sup>148</sup>*Institut für Prähistorische und Naturwissenschaftliche Archäologie (IPNA), Labor für Archäobotanik* de l'Université de Bâle.

<sup>149</sup>Dr. Christoph Brombacher, courrier électronique du 10 juillet 2007.

<sup>150</sup>Bortenschlager *et al.*, 1992, p.308 ; Richard, 1999, p.10-11; 41.

<sup>151</sup>Richard, 1999, p.10-15; 25; 41 ; Jochim, 2000, p.218-221.

<sup>152</sup>Bortenschlager *et al.*, 1992, p.308 ; Oeggel *et al.*, 2000, p.164.

la cause ont permis d'établir qu'il s'agit d'une conséquence d'un tannage à la fumée. Les pollens déjà piégés dans le cuir sont, en présence de graisses et des aldéhydes (présents dans la fumée), affectés par le traitement – duquel ils constituent ensuite une “signature”<sup>153</sup>.

CONTAMINATION. La contamination par des pollens modernes constitue un problème fondamental : ceux-ci sont transportés par les vents et la simple exposition à l'air est source de pollution. Les échantillons “classiques” de sédiment doivent ainsi être emballés dès le prélèvement<sup>154</sup>. De plus, la glace recueillie en permanence les pollens qui pourront, lors de la fonte, se retrouver concentrés par “sédimentation” dans / sur un artefact. Une analyse pollinique est actuellement en cours à l'*Institut für prähistorische und naturwissenschaftliche Archäologie* (IPNA), par le Dr. Lucia Wick.

### 3.2.4 Analyse des lipides

Même si la présence de pollens “modifiés” venait à être démontrée, elle ne constituerait qu'une information partielle quant à la technique de tannage réalisée : un complément nécessaire est alors la caractérisation du type d'huile / graisse utilisé pour l'imprégnation de la peau. Un échantillon a ainsi été prélevé en vue de l'analyse de son contenu en lipides<sup>155</sup>.

PRINCIPE GÉNÉRAL. Comme introduit sous le point 2.2.3, p.36, les graisses et huiles sont des triglycérides dont chacune des molécules est composée de trois acides gras. Un acide gras est une chaîne hydrocarbonée abrégée par  $C_{x:y}$  où “x” est le nombre d'atomes de carbone et “y” le nombre d'insaturation (double-liaison  $C = C$ )<sup>156</sup>. La *proportion* en différents acides gras constitue la signature d'une d'huile ou graisse. A titre d'exemple, l'huile d'olive est approximativement composée à 70% d'acide oléique ( $C_{18:1}$ ), 10% d'acide palmitique ( $C_{16:0}$ ) et 10% d'acide linoléique ( $C_{18:2}$ ). Certains acides gras, leurs rapports numériques, la présence d'isotopes stables et d'autre composants mineurs (stéroïdes) peuvent être employés comme *biomarqueurs*<sup>157</sup>.

La méthode d'analyse “générique” est une chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC / MS). Il s'agit là d'une technique employée pour la caractérisation de nombreuses substances, résidus, et éléments trace. A partir de matériaux de référence actuels et en connaissance des processus de dégradation des matières / substances anciennes, il est possible de déterminer l'origine naturelle des échantillons testés. En termes généraux, une GC consiste en la séparation des molécules d'une substance complexe sous forme gazeuse, dans un gaz vecteur, la *phase mobile*, en fonction de leur volatilité et affinité avec un substrat qui constitue la *phase stationnaire*. Si la séparation est bonne, l'opération aboutit à un chromatogramme sur lequel chaque pic correspond à un seul constituant moléculaire. Le couplage avec un spectromètre de masse permet ensuite, par fragmentation des molécules

---

<sup>153</sup>van Waateringe, 1995, p.67-70 ; van Waateringe *et al.*, 1999, p.884-890.

<sup>154</sup>Richard, 1999, p.24-25.

<sup>155</sup>Dr. Jorge W. Spangenberg, Institut de Minéralogie et Géochimie de l'université de Lausanne, analyse en cours.

<sup>156</sup>Spangenberg *et al.*, 2006, p.2.

<sup>157</sup>Regert et Rolando, 1996, p.122-125 ; Evershed, 2000, p.210-212 ; Regert *et al.*, 2003, p.1625 ; Goffer, 2007, p.318.

sous formes ioniques, de déterminer le type de molécules en présence pour un pic spécifique. Il existe de nombreuses variantes à la méthode, avec différents gaz vecteurs, phases stationnaires, dans des colonnes ou des tubes de différents types et pouvant être menées, par exemple, après pyrolyse de la substance.

Les étapes préliminaires de préparation d'un échantillon sont variées et dépendent du type de matériau à analyser : fondamentalement, il s'agit toutefois d'en extraire les composants dans un solvant organique ou d'en obtenir, par traitement chimique, des dérivés volatiles ou possibles à vaporiser sous différentes conditions de pression et température. Je recommande notamment la lecture de Evershed, 2000, qui présente les méthodes d'analyse de nombreux types de substance<sup>158</sup>.

CONTAMINATION. Les substances organiques résiduelles, parfois présentes en très faible quantité, sont sensibles aux phénomènes de dégradation et contamination. Il est nécessaire d'éviter tout contact, manipulation, nettoyage à l'eau ou ajout de solvant. Selon M. Regert et C. Rolando (1996), le stockage d'un artefact comportant des résidus organiques superficiels dans un Minigrip® ou un sachet en papier constitue une solution à proscrire en raison du risque de perte / dessèchement et de la contamination par les composants du matériau d'emballage. Une solution consiste à prélever immédiatement un échantillon de quelques milligrammes à l'aide d'un scalpel muni d'une lame neuve et de le stocker au froid dans un contenant de verre.

Dans un même souci d'éviter toute contamination par des composants organiques, le Dr. J.W. Spangenberg recommande d'envelopper les artefacts dans une feuille d'aluminium préalablement chauffée à 500°C pour une durée de 1 à 4 heures. Toutes les manipulations doivent ensuite être effectuées avec des instruments propres et gants de laboratoire<sup>159</sup>.

### 3.2.5 Analyse de l'ADN ancien

L'observation visuelle du cuir de la jambière n'ayant pas permis la détermination de l'espèce animale dont provient la dépouille, un échantillon de cuir a été prélevé en vue de l'analyse biomoléculaire de son contenu ADN<sup>160</sup>. Par ailleurs, l'examen de la partie interne de la pièce de cuir a révélé la présence de particules qui pourraient être des restes de peau humaine<sup>161</sup>, lesquelles ont également été prélevées.

L'analyse ADN est une méthode d'analyse en pleine expansion, dont le potentiel informatif est considérable : de la simple détermination d'espèce, animale ou végétale, aux affinités phylogéniques (liens de parenté) d'anciens échantillons, ou encore la détermination du sexe et la détection d'agents pathogènes chez un individu. Potentiellement, des études ADN comparatives peuvent permettre de retracer l'histoire de la domestication ou celle des civilisations<sup>162</sup>.

---

<sup>158</sup>Regert et Rolando, 1996, p.120-122 ; Evershed, 2000, p.183-189 ; Richards, 2005, p.130-131 ; Goffer, 2007, p.36-37.

<sup>159</sup>Dr. Jorge Spangenberg, courrier électronique du 04 avril 2008.

<sup>160</sup>Dr. Angela Schlumbaum, *Institute of Prehistory and Archaeological Science ; University of Basel*, analyse en cours.

<sup>161</sup>Suter *et al.*, 2005a, p.514 ; Détection : Marquita Volken ; détermination préliminaire : Dr. Antoinette Rast-Eicher ; Analyse ADN humain : Dr. Kurt W. Alt, *Institut für Anthropologie, Universität Mainz*, analyse en cours.

<sup>162</sup>Ludes et Crubézy, 1998, p.39 ; Richards, 2005, p.128 ; Goffer, 2007, p.352.

PRINCIPE GÉNÉRAL. Les *acides nucléiques* sont les substances porteuses de l'information génétique des être vivants : ils régulent l'activité cellulaire, permettent la production d'enzymes et protéines pour l'édification de molécules complexes et, via la reproduction, transmettent les caractères héréditaires d'un organisme. Il y a deux classes principales d'acides nucléiques : l'acide désoxyribonucléique (ADN) qui contient le code génétique, et l'acide ribonucléique (ARN) qui transmet ce dernier aux sites de synthèse des protéines. L'ADN est une molécule complexe, formée d'une hélice de deux brins complémentaires, les *nucléotides*. Ces derniers sont des biopolymères composés de *ribose* ( $C_5H_{10}O_5$ ), de groupes phosphates ( $PO_4^{3-}$ ) et de bases azotées au nombre de quatre : la guanine (G), la cytosine (C), l'adénine (A) et la thymine (T). Ces bases sont associées en paires qui se font face au sein de la chaîne d'ADN (G-C et A-T) et dont la séquence constitue le code génétique. Les cellules animales possèdent deux types d'ADN : l'ADN du noyau et l'ADN mitochondrial (ADNmt), qui se retrouve dans les mitochondries, organites jouant un rôle primordial dans la respiration des cellules. Alors que l'ADN nucléaire transmet les caractères génétiques des deux parents (mais comprenant également des zones spécifiques à chacun d'entre eux), l'ADNmt est hérité du côté maternel uniquement<sup>163</sup>.

L'ADN dit ancien est une molécule dégradée : l'enjeu de la recherche est de parvenir à détecter et séquencer des fragments intacts de régions spécifiques de l'ADN, porteuses des informations recherchées. Le succès d'une analyse dépend de la conservation de l'ADN, elle-même liée aux conditions du milieu. A ce titre, des conditions stables et froides tout comme la protection dans une matrice osseuse diminuent la cinétique de dégradation de la molécule. Les études actuelles se concentrent sur l'ADNmt, présent en quantité bien supérieure dans les cellules, et représentant ainsi de meilleures chances statistiques de préservation. La récupération d'ADN implique plusieurs étapes : *extraction* (opérations mécaniques, chimiques et enzymatiques, qui dépendent du type d'échantillon), *amplification* (par PCR, pour *polymerase chain reaction*, méthode capable, par la contribution d'enzymes, de cibler et reproduire un fragment particulier d'ADN), *séquençage* (réorganisation des fragments amplifiés) et *analyse des séquences*. Chacune de ces opérations est complexe et dépasse largement le cadre de ce travail. Je renvoie donc le lecteur intéressé aux documents référencés<sup>164 ; 165</sup>.

LIMITES DE LA MÉTHODE. La contamination est un problème majeur pour l'analyse ADN : selon le type d'étude mené, celle-ci peut survenir dans les sols, sur le site comme en laboratoire. Les laboratoires d'analyse disposent actuellement de mesures de contrôle pour garantir des conditions stériles, mais les contaminations sur les fouilles demeurent très préoccupantes : il peut évidemment s'agir de manipulation directe, mais également de desquamation et de sudation. S'il est relativement facile de déterminer une contamination par de l'ADN humain moderne sur de l'ADN végétal ou animal ancien, il n'en va pas de même pour l'ADN humain ancien pollué par le fouilleur ou le biologiste. Il est donc impératif de minimiser les risques de contamination dès les premières étapes, soit la découverte

---

<sup>163</sup>Tougard, 2004, p.29 ; Cruzbézi *et al.*, 2002, p.11-12 ; Goffer, 2007, p.343-348.

<sup>164</sup>Signalons ici que la plupart sont eux-mêmes des ouvrages de vulgarisation.

<sup>165</sup>Ludes et Crubézy, 1998, p.40-42 ; Burger *et al.*, 1999, p.1727 ; Tougard, 2004, p.29 ; Richards, 2005, p.128 ; Cassman et Odegaard, 2007a, p.93 ; Goffer, 2007, p.348-351.

d'un artefact<sup>166</sup>.

PRÉCAUTIONS. Pour l'ADN humain, l'échantillonnage doit être réalisé aussi vite que possible, sur le terrain, par un fouilleur désigné portant masque respiratoire et gants de laboratoire non poudrés. Ces derniers doivent être changés à chaque nouveau prélèvement. Il convient également de relever les noms des personnes présentes au moment de prélèvement, dont le nombre doit par ailleurs être limité<sup>167</sup>. Le stockage des échantillons dépend ensuite de l'état hydrique : un échantillon sec peut être stocké dans un Minigrip<sup>®</sup> ou un tube de préparation, mais il n'en va pas de même pour les matériaux humides, l'eau étant préjudiciable à la préservation de l'ADN. Le risque est également ici le développement de micro-organismes, qui peuvent altérer l'ADN de l'échantillon. De manière générale, un stockage à basse température est recommandé, l'idéal étant des températures de l'ordre de -20°C, voire encore inférieures<sup>168</sup>.

Lorsque le prélèvement n'est pas réalisé sur le terrain, le microbiologiste recommanderait alors de laisser sécher le matériau, emballé de manière lâche dans une feuille d'aluminium, disposée ensuite dans un sachet non étanche<sup>169</sup>, ce qui n'est toutefois pas souhaitable du point de vue de la conservation préventive. Le Dr. Angela Schlumbaum, consciente du problème et des compromis que nécessite la situation, propose alors de conserver humide un artefact trouvé humide, mais de manière aussi provisoire que possible<sup>170</sup>.

### 3.3 Synthèse

L'exemple choisi pour illustrer la problématique du potentiel d'analyse des matériaux organiques n'est évidemment pas représentatif : il s'agit bien au contraire d'une pièce tout à fait exceptionnelle. Comme le souligne le Dr. Albert Hafner, une large majorité des artefacts retrouvés peuvent être compris au travers de leur observation morphologique et typologique, sans que la mise en oeuvre d'analyses instrumentales ne soit pertinente<sup>171</sup>.

Quoi qu'il en soit, le potentiel informatif des artefacts issus de la glace est extrêmement large : des substances organiques de divers types peuvent, dans l'absolu, être retrouvées soit indépendamment, soit en association avec d'autres matériaux. Le tableau suivant vise à représenter cette variété :

---

<sup>166</sup>Ludes et Crubézy, 1998, p.41 ; Richards, 2005, p.128-129 ; Yang et Watt, 2005, p.332 ; Cassman et Odegaard, 2007a, p.93 ; Cassman et Odegaard, 2007b, p.105.

<sup>167</sup>Burger *et al.*, 1999, p.1724 ; Yang et Watt, 2005, p.332-334 ; Prof. Eric Crubézy, entretien téléphonique du 06 juillet 2007 ; Dr. Kurt W. Alt, courrier électronique du 26 mai 2008.

<sup>168</sup>Yang et Watt, 2005, p.333-334 ; Dr. Eric Crubézy, entretien téléphonique du 06 juillet 2007 ; Dr. Angela Schlumbaum, courrier électronique du 10 juillet 2007.

<sup>169</sup>Yang et Watt, 2005, p.333-334.

<sup>170</sup>Dr. Angela Schlumbaum, courrier électronique du 10 juillet 2007.

<sup>171</sup>Dr. Albert Hafner, discussion du 06 décembre 2007.

	Bois	Peau/Cuir	Os/Dent	Textile/Fibres	Glace/Sédiments	Autres
Dendrologie	□			□		
Dendrochronologie	□					
Fibres / microrestes végétaux	△ ○	△ ○		□ △ ○	○	□
Anthracologie	[□]				○	□
Carpologie		○		○	○	□
Palynologie		○		○	○	
Phytolithes		○	×	○	○	×
Macrorestes animaux		□	□	□		
Fibres animales	△ ○	□ △ ○		□ △ ○	○	
Insectes	○	○		○	○	□
Coprolithes		○		○	○	□
Analyses ADN	□	□	□	□		□
Analyse des lipides	△ ×	□ △ ×		△ ×		×
Autres résidus organiques	△ ×	△ ×		△ ×		□ △ ×
Datation radiocarbone	□	□	□	□	□	□
Analyse des isotopes stables			□	□		□

□ : **Analyse / étude des matériaux constitutifs**  
(Ex. : détermination des fibres végétales d'un textile)

× : **Analyse de substances résiduelles, traces d'usage**  
(Ex. : résidus organiques au fond d'un récipient)

△ : **Analyse de matériaux technologiques**  
(Ex. : fils de couture de pièces de cuir ; substances de tannage d'une peau ; résidus de braie de bouleau sur une pointe lithique)

○ : **Indices potentiellement piégés dans la structure d'un artefact**

TAB. 1 – *Quelques analyses / études réalisables sur une sélection de matériaux organiques*

Ce tableau<sup>172</sup> illustre deux aspects principaux : (i) le caractère composite de nombreux objets fonctionnels, dont la technologie repose sur la modification et la combinaison de plusieurs matières premières ; (ii) le fait que des microrestes de divers types, souvent indétectables à l'œil nu, peuvent se dissimuler dans la structure d'autres artefacts. La difficulté évidente est qu'il n'est pas possible d'établir à l'avance quelle analyse sera – ou ne sera pas – réalisée. Aussi, à titre préventif, est-il souhaitable de considérer chaque artefact comme s'il devait contenir les indices archéologiques les plus sensibles à la contamination.

Il est important de souligner ici que seul l'*ensemble* des analyses mène à la compréhension globale d'un artefact dans son contexte culturel / historique / faunique / climatique particulier. De même, ce sont les études *conjuguées* de

<sup>172</sup>Réaliser à partir de : Bortenschlager *et al.*, 1992, p.308; 311 ; Bagolini *et al.*, 1995, p.9-11 ; Spindler, 1996, p.254-256 ; Regert et Rolando, 1996, p.122-126 ; Fell, 1996, p.48 ; Chabal *et al.*, 1999, p.43 ; Brochier, 1999, p.169 ; van Waateringe *et al.*, 1999, p.883 ; Jacomet et Schibler, 1999 ; Jochim, 2000, p.213-214 ; 221-222 ; Oeggl et Schoch, 2000, p.55-61 ; Pfeifer et Oeggl, 2000, p.70 ; Schedl, 2000, p.151-152 ; Oeggl *et al.*, 2000, p.164 ; Regert *et al.*, 2003, p.1621 ; Bouchet *et al.*, 2003, p.49 ; Hare *et al.*, 2004, P.264-266 ; Richards, 2005, p.127-132 ; Roy *et al.*, 2005, p.444-445 ; Suter *et al.*, 2005a, p.507-514 ; Spangenberg *et al.*, 2006, 1-3 ; Vuissoz *et al.*, 2007, p.827 ; Marquita Volken, synthèse de discussions.

l'*ensemble* du mobilier archéologique qui permettent celle d'un site<sup>173</sup>. L'un des objectifs de ce travail est ainsi, par des mesures de conditionnement adéquates et en évitant les manipulations inappropriées, de ne pas compromettre les futures analyses.

### **Conservation in situ (ii) : mesures de sécurisation des indices**

Afin de ne pas influencer de futures analyses, plusieurs mesures s'imposent sur le terrain :

1. **Porter des gants** de laboratoire non poudrés pour toute manipulation directe (à changer entre chaque artefact) ;
2. Utiliser des **outils propres** ;
3. **Ne pas** chercher à **nettoyer** un artefact ;
4. Ne pas ouvrir/déplier un artefact (textile ; cuir) : **emballer un artefact dans sa position de découverte** ;
5. Procéder à l'ensemble des opérations **aussi vite que possible**.

Pour tout reste d'**origine humaine**, la desquamation, sudation, ou les particules de salives constituent des sources de contamination et les mesures suivantes sont également nécessaires :

6. **Porter un masque de protection buccale** ;
7. **Documenter les noms des personnes en présence**.

L'expérience a montré que des analyse d'ADN humain peuvent également être réalisées sur des matériaux d'origine non anthropologique, aussi devrait-il être recommandé de respecter l'ensemble de ces mesures lors de la découverte et de l'emballage de tout artefact.

---

<sup>173</sup>Marquita Volken, synthèse de discussion ; Dr. Albert Hafner, discussion du 12 décembre 2007.

## 4 Emballage et protection des artefacts

Dans son introduction à la problématique de la conservation en archéologie, J.M. Cronyn soulève trois points fondamentaux de tout projet de conservation *in situ*, et qui s'appliquent parfaitement au contexte du présent travail :

1. « *Even before a site is excavated it is important to consider the conservation requirements likely in order to ensure that adequate facilities and funds are available.* » l'aspect de la logistique, soit de l'anticipation et préparation du matériel potentiellement nécessaire, est essentiel pour une expédition sur un site éloigné de plusieurs heures de marche. Une fois sur place, le matériel emporté constituera la seule ressource à partir de laquelle agir et improviser ;
2. « [...] *A second consideration is the demands which will be made upon the artefacts.* » Ce point concerne la documentation et la sécurisation des indices archéologiques, dont l'importance est soulignée dans la partie précédente ;
3. « [...] *An equally important pre-excavation consideration [is] that of the burial conditions expected, for these will affect [...] the condition of material recovered [...]* » (Cronyn, 1990, p.4-5). Les conditions d'enfouissement et, pour la glace, de découverte, constituent les critères de base sur lesquels reposent les choix et la préparation du matériel.

Cette partie constitue le centre du travail pratique réalisé pour l'ADB. Le conditionnement *in situ* et le transport peuvent être considérés comme une problématique globale qui vise à assurer des conditions de stockage optimales à la préservation des artefacts. Mes recherches se divisent en deux domaines qui sont l'emballage des artefacts d'une part, et la réalisation d'un caisson isotherme de stockage et transport du mobilier archéologique d'autre part. Une première section récapitule les paramètres à prendre en compte et développe le concept général de ce projet. Sont ensuite décrits les critères de choix et la sélection des matériaux, puis certaines des options d'emballage. La description du caisson isotherme, bien qu'il soit également destiné à la protection des artefacts, se fait dans la partie suivante [5 *Stockage in situ et transport*, p.84].

### 4.1 Objectif général : le maintien du statu quo

Le conditionnement *in situ* consiste à limiter les risques à chaque étape de l'histoire d'un objet et débute ainsi dès la mise au jour (ou découverte) d'un artefact. Il s'agit ici de développer des solutions d'emballage adaptées aux matériaux, en fonction des problématiques particulières que ceux-ci présentent au moment de leur découverte<sup>174</sup>. Si mon travail ne concerne en rien les opérations de conservations ultérieures, il se doit de garantir aux spécialistes qui s'occupent des traitements un champ de réflexion aussi large que possible, sans que celui-ci ne soit tronqué par les mesures prises sur le terrain. Aussi, le principe de base auquel vise l'ensemble de mon travail est le maintien du *statu quo*. Plusieurs remarques doivent toutefois être apportées quant à ce que peut signifier le *statu quo* pour des objets issus de la glace.

---

<sup>174</sup>Cronyn, 1990, p.5 ; Logan *et al.*, 2001, p.137 ; 139.



#### 4.1.1 Types d'artefacts

Comme nous l'avons vu au travers de divers exemples d'artefacts découverts en milieux gelés, tous les types de matériaux peuvent potentiellement être retrouvés, du très anecdotique (comme une paire de lunettes en plastique rose associée à un fragment de biscuit – lequel pourrait être médiéval !), au plus “macabre”. Il existe évidemment une infinité de possibles qui, pour être appréhendée, demande un certain degré de catégorisation par exemple en fonction des *propriétés géométriques et structurelles* des artefacts, soit les caractéristiques intrinsèques au niveau de leur forme, de leurs dimensions et de leur *stabilité physique* (ou capacité à résister aux altérations d'ordre mécanique).

##### **A – Artefacts de dimensions “standard”**

Sont ici considérés comme “standards” les artefacts dont aucune des dimensions ne dépasse [25 × 35 × 45 cm]. Ces limites correspondent aux dimensions intérieures du caisson de stockage et transport.

A1 – COHÉSION STRUCTURELLE SUFFISANTE. Cette catégorie regroupe les artefacts de petite taille qui ne présentent pas un risque élevé de rupture ou autres altérations mécaniques. Il peut s'agir d'objets ou de fragments de matériaux divers, dont le point commun est qu'un emballage dans un Minigrip® sera jugé suffisant.

A2 – OBJETS PLATS / SOUPLES / FRAGILES. Artefacts qui, de par leurs propriétés structurelles, ne peuvent être manipulés ou transportés sans risque de perte d'intégrité physique. Un morceau de textile est ici l'exemple type : selon son état, des fragments pourront se détacher et devra être manipulé et conditionné avec soin. La caractéristique est ici le *besoin de support*.

A3 – COHÉSION STRUCTURELLE FAIBLE. Objets fragiles qui, en plus d'un besoin de support, nécessitent un certain degré de *contention* pour éviter que l'artefact se rompe, se disloque, ou que des fragments superficiels se détachent.

##### **B – Artefacts “volumineux”**

B1 – COHÉSION STRUCTURELLE SUFFISANTE. Artefacts qui, bien que de grandes dimensions, pourront être transportés sans être protégés autrement que par la réalisation d'un emballage. Il pourrait s'agir d'objets robustes ou encore d'artefacts présentant des caractéristiques de souplesse qui ne font pas craindre des altérations mécaniques liées au transport (cas rare).

B2 – ARTEFACTS LONGS / CASSANTS. Risque de rupture important. Ces artefacts nécessitent un soutien / renfort physique qui permette de les fixer sans risque sur un sac à dos.

B3 – ARTEFACTS GROS / FRAGILES. Artefacts qui demandent à la fois la réalisation d'un support et d'une protection externe pour pouvoir être transportés (et parfois même prélevés) de manière sécurisée.

##### **C – Artefacts “intransportables”**

Artefacts qu'il n'est pas possible de transporter à dos d'homme en raison de leurs dimensions ou d'un poids trop élevé. Il pourrait également s'agir d'une découverte de trop grande valeur scientifique pour prendre le risque d'une

rupture de la chaîne du froid. Comme expliqué dans la première partie de ce document, la logistique inhérente à cette “catégorie” ne fait pas partie des objectifs de mon travail.

Un tel découpage est forcément trop schématique et chaque artefact doit faire l'objet d'une réflexion spécifique, au cas par cas. Ces catégories sont d'autant plus artificielles qu'elles se basent en partie sur les solutions envisagées pour répondre à différentes situations : comme nous le verrons, le caisson isotherme offre une protection physique pour les artefacts de “type A” ; pour le “type B”, d'autres options de protection devaient donc être développées. Cette classification constitue toutefois la solution retenue ici pour éviter de me perdre en conjectures, car l'état à la découverte constitue un autre ensemble de variables...

#### 4.1.2 Scénarii de découverte

La fonte est l'élément essentiel qui préside à la découverte d'un artefact. A partir de ce point, différents cas de figure peuvent se présenter :

1. OBJET SEC. *Sur un col de montagne encore absent de toute carte archéologique, un groupe de randonneurs relève la présence d'une concentration surprenante de fragments de bois et autres restes organiques difficilement identifiables. De retour en plaine, il font immédiatement part de leur découverte au service archéologique, lequel dépêche sur place une équipe chargée d'évaluer le site. Aux abords d'un névé sont concentrés, entre autres, divers fragments de “vieille peau” dont l'apparence et la texture s'apparentent à du carton froissé.*
2. OBJET HUMIDE. *Quelques jours plus tard, par une belle journée automnale, l'équipe de fouille présente sur le site observe l'apparition de l'extrémité d'un artefact de bois dans une rigole creusée par l'eau de fonte ; ils procèdent alors au dégagement de la partie encore prise dans la matrice, entaillant progressivement la glace, accélérant la fonte aux abords de l'objet, tout en protégeant du soleil les parties déjà émergées, évitant ainsi leur dessiccation. Au final, le bois présente une surface humide, sans qu'il ne soit toutefois possible de le considérer comme véritablement gorgé d'eau.*
3. OBJET PARTIELLEMENT HUMIDE / SEC. *Sur le front de fonte de la même plaque, un membre de l'équipe de fouille remarque une pièce en cuir, encore partiellement prise dans, ou plus exactement “sous” la glace. Alors que sa base est plongée dans de l'eau de fonte, la partie supérieure présente une surface déjà desséchée par le soleil et le vent d'altitude.*
4. OBJET POTENTIELLEMENT GORGÉ D'EAU. *Après une entière semaine de pluie qualifiée d'« épisode climatique diluvien » dans les informations météorologiques, l'équipe de fouille peut enfin retourner sur le site et y observe une réduction marquée du banc de glace. A la base de ce dernier, une petite “gouille”<sup>175</sup> s'est formée au fond de laquelle l'équipe identifie un artefact en écorce de bouleau. Depuis combien de temps cet objet est-il dans cette situation ? Difficile à estimer, mais un minimum de plusieurs jours, selon toute*

---

<sup>175</sup> J'utilise ici le terme *gouille* (hélvétisme) pour désigner une accumulation d'eau ponctuelle et non permanente, de dimensions et profondeur supérieures à une flaque, et que les termes de langue française, “mare” ou “étang” ne parviennent pas, il me semble, à retranscrire.

*vraisemblance.*

Ces quelques exemples pourront sans aucun doute être jugés trop romancés : le premier scénario est hautement improbable, la découverte du site n'étant plus à faire ; de même le numéro quatre est irréaliste, les terrain de haute montagne se prêtant généralement mal à l'accumulation d'eau. Ils ne visent cependant qu'à illustrer la diversité de situations susceptibles d'être rencontrées dans un contexte factice, "similaire" à celui du Schnidejoch, ainsi qu'à souligner une fois encore, au travers du deuxième scénario, l'incertitude quant à l'état hydrique des matériaux organiques préservés dans la glace, avant leur libération.

On l'aura deviné, la plupart des catégories définies dans la sous-section précédente peuvent se "conjuguer" aux quatre états de découvertes que sont *sec*, *humide*, "*imbibé*" (potentiellement gorgés d'eau) et état "*mixte*".

#### 4.1.3 Maintien de l'hygrométrie

DE LA THÉORIE... Nous avons vu dans la 2<sup>e</sup> partie de ce travail l'importance de maintenir l'hygrométrie des matériaux organiques en attente d'un traitement. L'activité thermodynamique de l'eau ( $A_W$  ; cf. point 2.2.5, p.37) est définie par rapport à l'humidité relative (HR) du milieu. Toute différence de pression de vapeur entraîne un gradient d'humidité et les molécules d'eau se déplacent alors du point le plus humide vers le plus sec. L' $A_W$  suit les fluctuations de l'HR, avec un certain décalage, qui dépend lui-même des propriétés d'un matériau et des dimensions d'un objet. Une brindille s'équilibrera à son environnement en quelques minutes ; il faudra bien plus de temps à une branche de plusieurs centimètres de diamètre. Du fait de ce décalage, les fluctuations de HR sont particulièrement dommageables aux bois de grandes dimensions. Le bois est un matériau anisotrope : les variations de dimension sont près de deux fois supérieures dans sa direction tangentielle par rapport à sa direction radiale ; un gradient hydrique y génère ainsi des tensions internes considérables<sup>176</sup>.

L'humidité relative se définit comme :

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad (1)$$

où :  $P_v$  la pression de vapeur [Pa] ;  
 $P_{vs}$  la pression de vapeur saturante  
à même température [Pa].

La pression de vapeur saturante dépend de la température et de la pression atmosphérique. La température est un facteur primordial en terme d'impact sur l'humidité relative : dans un volume clos, une différence de quelques degrés cause une importante variation de l'HR<sup>177</sup>. La pression atmosphérique dépend à la fois de l'altitude et des conditions météorologiques et, pour la démonstration suivante, je la considère comme une constante.

---

<sup>176</sup>Grattan, 1987, p.63 ; Méric, 2000, p.29; 31-32 ; Bratasz *et al.*, 2005, p.582; 588.

<sup>177</sup>Weintraub et Wolf, 1995, p.123.

Lors d'une expédition à la mi-août 2007<sup>178</sup> un *datalogger* emporté dans une poche a enregistré des températures de près de 25°C à 3000 m d'altitude (au soleil, dans un sac à dos de couleur sombre). Celles-ci chutent à 15°C en une dizaine de minutes lors des passages à l'ombre. Un deuxième *datalogger* disposé au fond de mon sac à dos a relevé des températures légèrement inférieures (avec un maximum de 21°C à 3000 m), qui suivent les premiers enregistrements de manière nivelée, avec un décalage temporel d'une vingtaine de minutes. Je donne ici ces détails pour envisager l'impact sur un artefact très humide ( $A_W$  de 0.8) prélevé dans la glace (0°C), immédiatement disposé dans une boîte étanche, puis dans un sac à dos.

En théorie, un volume clos avec une HR initiale de 80% à 0°C, amené à une température de 20°C, entraîne la chute de l'HR à 20% environ<sup>179</sup>, ce qui, sur le diagramme psychrométrique [FIG.21] est représenté par le passage du point A au point B. C'est là une humidité relative bien trop basse pour le stockage des matériaux organiques qui pourront se dessécher rapidement et devenir cassants<sup>180</sup>.

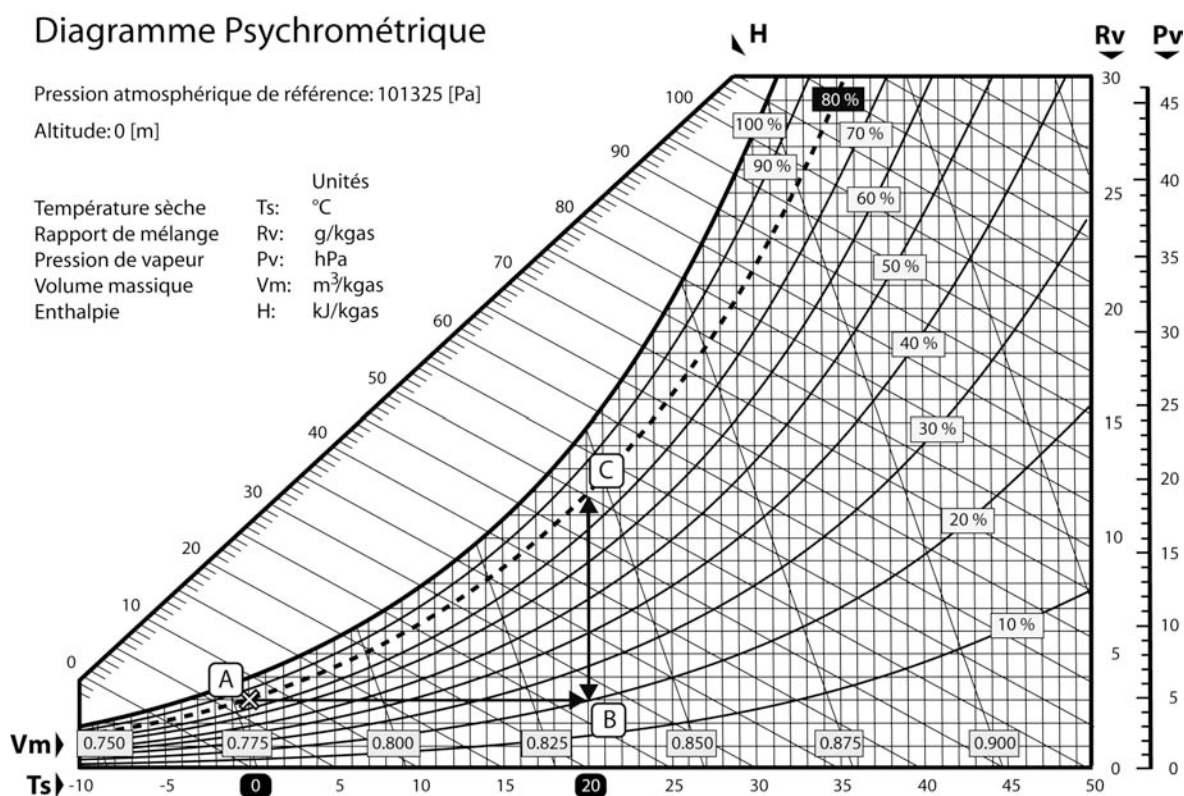


FIG. 21 – Diagramme psychrométrique.

Il faut cependant replacer ces données dans leur contexte qui est celui d'un emballage. Prenons l'exemple d'un panier en osier d'un diamètre moyen de 25 cm pour une hauteur de 30 cm et ayant conservé sa forme<sup>181</sup> (catégorie

<sup>178</sup>Expédition réalisée sur le Lötschenpass (BE) pour une première simulation des techniques de dégagement de Charlotte Rerolle, accompagnés de Renate Ebersbach et Elisabeth Zahnd, co-responsables du projet *Alpine Prospektion* (ADB).

<sup>179</sup>Les calculs sont ici réalisés à l'aide d'une matrice mathématique sous forme d'un fichier Microsoft® Office Excel™, aimablement mis à ma disposition par Thierry Jacot, professeur chargé de cours à la HEAA Arc.

<sup>180</sup>Weintraub et Wolf, 1995, p.124.

<sup>181</sup>Cet exemple est celui de ma corbeille à papier de bureau.

B3 ; retrouvé très humide). L'emballage de la pièce est réalisé sans combler le volume intérieur (15 dm<sup>3</sup> environ). Il s'agit d'un cas déjà "extrême" d'artefact de géométrie creuse comprenant un grand *volume d'air*. La quantité d'eau pour combler ce volume (maintien de l'HR), soit le manque entre les points B et C sur le diagramme psychrométrique, équivaut alors à 0.15 g, moins d'1 ml, quelques gouttes<sup>182</sup>.

...À LA PRATIQUE. En fait, la plupart des artefacts retrouvés à leur libération de la matrice de glace auront absorbé, au cours de la fonte, une quantité d'eau qui entraînera la saturation du micro-environnement de l'emballage. Le véritable problème est que les objets risquent alors de littéralement baigner dans celui-ci. Il paraît légitime de se questionner ici quant à la pertinence de chercher à maintenir un artefact retrouvé imbibé d'eau (voire "dégoulinant") dans un état qui constitue déjà un changement radical de milieu. Le Dr. Jörg Schibler, à qui est confiée l'étude du mobilier osseux pour l'ADB, signale explicitement que les os ne devraient pas être stockés dans un milieu saturé, même s'ils proviennent de sites subaquatiques, mais faire l'objet d'un séchage lent et contrôlé dès leur découverte<sup>183</sup>. Les publications concernant les artefacts issus d'un contexte de permafrost soulignent l'importance de ne pas "noyer" les artefacts, ceux-ci n'étant généralement pas véritablement gorgés d'eau<sup>184</sup>.

Dans l'Arctique canadien, la solution retenue pour le maintien de l'hygrométrie se base sur l'utilisation de sphaigne, plante souvent disponible à proximité des sites. Les avantages sont multiples : elle joue à la fois le rôle de matériau tampon (qui va libérer de l'eau en cas de manque et / ou absorber le surplus d'humidité dégagé par un objet) et de *cushioning*<sup>185</sup>. De plus, à basses températures, la sphaigne est un biocide naturel qui va ralentir efficacement le développement des micro-organismes<sup>186</sup>. Seulement, la sphaigne n'est pas directement présente dans la région du Schnidejoch<sup>187</sup>.

## 4.2 Sélection des matériaux d'emballage et de protection

Il ne paraît pas souhaitable de décrire ici les cheminements mentaux empruntés pour aboutir de la sélection des matériaux d'emballage. Cette dernière découle évidemment de fonctionnalités recherchées et de critères de choix, mais également de facteurs externes, impondérables, tels que les hasards de lectures, de discussions ou la simple disponibilité d'échantillon test. De nombreuses pistes, souvent sans issues, ont été suivies et un temps considérable a été consacré à la recherche de fournisseurs (concurrentiels), à la procuration d'échantillons et à l'obtention d'information sur la composition de certains produits, documentation parfois impossible à se procurer. A l'opposés, certains produits / matériaux sont "standards" et utilisés en conservation-restauration avec succès depuis de nombreuses années : les sections suivantes ne s'attardent pas sur ces derniers.

---

<sup>182</sup>Calculs réalisés à partir de Jacot et Pedregal, 2007, p.2-3 ; et matrice de calcul susmentionnée.

<sup>183</sup>Dr. Jörg Schibler, discussion du 08 février 2008 et courrier électronique du 04 mai 2008.

<sup>184</sup>Hett, 1987, p.66 ; Scott et Grant, 2006, p.14.

<sup>185</sup>J'utilise ici le terme anglais *cushioning*, pour désigner l'action de contention / immobilisation et protection physique (absorption des chocs).

<sup>186</sup>Hett, 1987, p.66-67 ; Grant, 1993, p.6 ; Logan *et al.*, 2001, p.141 ; Scott et Grant, 2006, p.12-14.

<sup>187</sup>Du moins pas en quantité suffisante (ce sont par ailleurs des espèces protégées).

#### 4.2.1 Quelques critères

Les matériaux nécessaires à l'emballage pour ce projet visent fondamentalement à répondre à un maximum de cas de figures. Un produit particulier est sélectionné en fonction de ses propriétés physiques, selon une et si possible des *fonctionnalité(s)* recherchée(s) : c'est là un premier ensemble de critères. Un second groupe évident *a priori* est l'innocuité du matériau du point de vue des altérations physiques et chimiques, tant pour l'objet que pour les études et analyses consécutives. S'ajoutent à ces deux ensembles des critères externes tels que le poids, le(s) format(s) et quantité (minimale) disponibles, le prix, etc.

1. FONCTIONNALITÉ. Les fonctions souhaitées pour les matériaux d'emballage sont multiples ; je les réparties ici en trois groupes :

- **Barrière physique.** Il s'agit de prodiguer à un objet une séparation avec son environnement, tant pour des questions de maintien de l'état hydrique que de contamination. Pour l'archéologue, la séparation physique des artefacts répond avant tout au besoin de documentation / inventorisation ;
- **Maintien de l'hygrométrie.** Matériau tampon (cf. sphaigne ci-dessus) ;
- **Protection.** Les matériaux organiques peuvent être très fragiles et les opérations de prélèvement comme d'emballage demandent parfois la mise en oeuvre de protections physiques supplémentaires à un simple emballage : ce groupe comprend les solutions de support, de maintien / contention / immobilisation souple (*cushioning*) et de protections externes rigides<sup>188</sup>.

2. INNOCUITÉ. L'innocuité relève de deux domaines distincts :

- **L'innocuité physique / mécanique** correspond à un contact adapté, ne risquant pas d'altérer la surface d'un objet. Une caractéristique importante est que le matériau ne dégage pas de fibres ou particules, pertes de matière qui équivalent à des pollutions. Pour les matériaux en contact *direct*, les critères de sélection sont la stabilité mécanique et un caractère doux / lisse, à opposer à une texture fibreuse, rugueuse ou électrostatique, qui risque d'accrocher la structure d'un artefact et d'entraîner la perte de fragments<sup>189</sup> ;
- **L'innocuité chimique** relève de la conservation préventive comme de la contamination (cf. point 3.2.4). Il s'agit de toute substance qui pourrait être dégagée par le matériau d'emballage. Pour les polymères synthétiques, il peut s'agir de produits de dégradation (dépolymérisation) comme d'additifs de fabrication (toujours présents en certaine proportion dans les matières plastiques) ou d'apprêts de finition (agent anti-UV, anti-statique, etc.). Le critère de sélection est ici l'inertie / stabilité chimique<sup>190</sup>.

3. POLYVALENCE. L'adaptabilité est un aspect hautement recherché pour ce genre de projet. Face à la diversité des possibles et à la limitation en poids de l'équipement (qu'il faut bien pouvoir transporter), il est souhaitable que les matériaux d'emballage puissent être utilisés dans plusieurs situations. La polyvalence est à mettre en balance avec la fonctionnalité spécifique d'un produit.

---

<sup>188</sup>Logan *et al.*, 2001, p.139.

<sup>189</sup>Guillemard, 2003, p.3 ; Cassman et Odegaard, 2007b, p.109 ; Roberts et Eklund, 2007, p.196.

<sup>190</sup>Baker, 1995, p.305 ; 314 ; Guillemard, 2003, p.3-4.

#### **4.2.2 Matériaux retenus**

Avant d'expliciter certains choix, solutions et options d'emballage, je souhaite donner au lecteur une première vue d'ensemble des produits sélectionnés. Le tableau 2 en donne les noms et principales caractéristiques ; les sections suivantes décrivent quelques une des combinaisons possibles entre ces différents matériaux.

Nom	Composition	Description / caractéristiques	Usage
<b>En contact direct</b>			
Minigrip®	PELD	Sachet à fermeture zip ; transparent ; disponible en différents formats.	Emballage simple A1 ; Ω Plaques PP cannelé ; Ω feuille d'aluminium.
“Tube” PELD	PELD	Tube de PELD sous forme de rouleau.	B2 : emballage d'objets longs.
Tyvek®SOFT 1560B (DuPont™)	PEHD	Non-tissé, fibres PEHD thermolées ; imperméable à l'eau / perméable à la vapeur ; inerte / stable ; opaque.	Surface douce, souple → contact adapté à la plupart des surfaces ; multi-usages. Ω Dermotekt® ; Ω Film PELD.
Plaques de PP cannelé (Akylux® de DS Smith Plastics Ltd.)	PP	Plaques légères ; faciles à découper ; chimiquement stables.	Multi-usages (A2 ; A3 ; B3) ; support idéal pour les artefacts plats ; possibilité de réalisation de boîte.
Feuilles d'aluminium	Al	Innocuité chimique pour les matériaux organiques.	Emballage d'échantillons prélevés <i>in situ</i> ou d'artefacts présentant des résidus superficiels.
<b>En contact indirect</b>			
Dermotekt® (W.SÖHNGEN GmbH)	PES	Drap de pansement médical (feutre PES) [1.2×0.8m] ; haute capacité d'absorption (1 kg/m²) ; légèrement étirable ; stérilisé à l'oxyde d'éthylène.	Matériau tampon pour artefacts humides / imbibés ; Ω Tyvek® ; Ω Film PELD.
Cellona® (Lohmann & Rauscher International GmbH & Co)	PES	Bande de feutre de rembourrage [0.1×3m] ; léger / volumineux.	<i>Cushioning</i> ; multi-usages ; Ω Vetcast™ Plus ; Ω Tyvek®.
Film PEHD	PEHD	Film alimentaire ; légèrement étirable ; transparent.	Barrière finale pour un emballage multi-couches ; objets humides / volumineux (B1 ; B3) ; Ω Tyvek® ; Ω Dermotekt®.
<b>Protection externe d'un emballage</b>			
Attelle métallique (Provet AG)	Acier INOX	“Échelle” métallique – attelle vétérinaire [4cm×1m] ; rigide / déformable ; possibilité d'assemblage ; relativement légère.	Réalisation de supports pour artefacts longs / cassants (B2) ou volumineux (B3) ; Ω Cellona® ; Ω Vetcast™ Plus.
Vetcast™ Plus (3M™)	Fibres de verre & résine PU	Bande vétérinaire d'immobilisation [7.5cm×3.6m] & [12.5cm×2.7m] ; grande adaptabilité / souplesse durant l'application ; rigide en ≤ 10mn.	Réalisation des supports et coques de protection externe ; Objets types B2 ou B3 principalement ; Ω Cellona® ; Ω Attelles métalliques.

PEHD : Polyethylen High Density ;  
 PELD : Polyethylen Low Density ;  
 PES : Polyester ;

PP : Polypropylène ;  
 PU : Polyuréthane ;  
 Ω : “Produit notamment utilisé en combinaison avec”.

Les matériaux pour lesquels aucun fabricant n'est spécifié sont couramment utilisés par l'ADB ; les autres ont été sélectionnés pour répondre aux besoins du projet.

TAB. 2 – Matériaux d'emballage et de protection retenus pour le projet.



### 4.2.3 Contrôle de certains matériaux

La famille des polyesters regroupe une large variété de produits sur la base de liaisons ester  $[-CO-O-]$ . Pour autant qu'il s'agisse de produits dits 100% PES et que le liage soit physique (à chaud), les non-tissés PES sont des matériaux chimiquement inertes et stables, fréquemment utilisés en conservation préventive. Il en va de même pour les polyoléfines (PE :  $[-CH_2-CH_2-]_n$  ; PP :  $[-CH_2-CH-CH_3-]_n$ ), composés uniquement de carbone et d'hydrogène. La "pureté" (formulation chimique exacte et quantité / nature des additifs) demeure pourtant une question problématique<sup>191</sup>.

COMPOSITION DU DERMOTEKT®. Confronté à quelques difficultés pour obtenir des informations claires quant à la composition chimique du Dermotekt®, et en raison de la crainte qu'il puisse s'agir d'un SAP (*Super absorbent Polymer*), j'ai demandé une analyse par spectrométrie Infrarouge à Transformée de Fourier (FT-IR) à la *Hochschule der Künste Bern* (HKB)<sup>192</sup>. Les SAP se basent sur l'absorption chimique (à opposer à hygroscopique) de l'eau, par l'adjonction de groupes fonctionnels à la composition des polymères pour en découpler le pouvoir de rétention<sup>193</sup>.

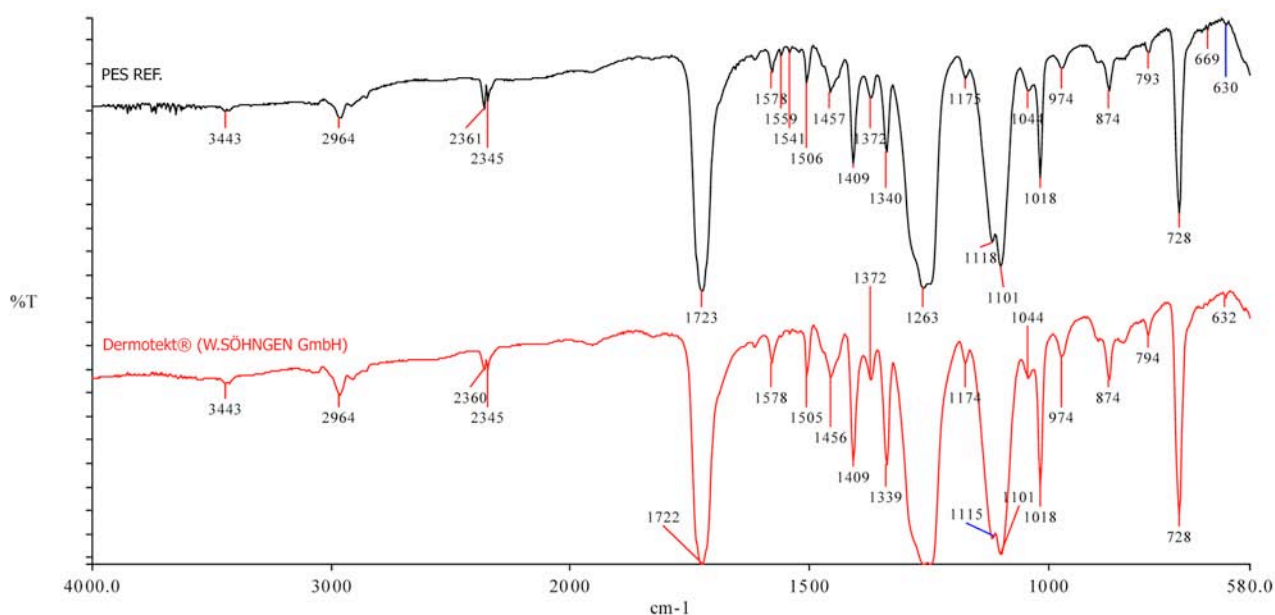


FIG. 22 – Spectre FT-IR du Dermotekt®.

Cette hypothèse a toutefois pu être rejetée, le spectre du Dermotekt® correspondant bien à celui de polyester de référence [FIG. 22]. Toutefois, il est à souligner que l'analyse telle qu'elle a été réalisée ne fournit pas de renseignements sur les additifs, présents en de trop faibles quantités<sup>194</sup>.

<sup>191</sup>Hatchfield, 2002, p.140-141; 146-152; Guillemard, 2003, p.39-41; 47; Préserv'Art – site du Centre de Conservation du Québec (CCQ).

<sup>192</sup>Appareil : Perkin System 2000; logiciel informatique : SPECTRUM V.2.00 (©1998 Perkin-Elmer Ltd.)

<sup>193</sup>Voir par exemple : Dry & Safe GmbH, site commercial.

<sup>194</sup>Analyse réalisée avec la précieuse aide de Vinciane Bruttin, étudiante / diplômante à la HEAA Arc, alors en stage à la HKB; Interprétation des résultats : Dr. Caroline Forster; discussion du 15 mars 2008.

COMPATIBILITÉ CHIMIQUE. Afin de tester l'éventuelle présence de composants volatiles à risque dans le Dermotekt<sup>®</sup> et le Tyvek<sup>®</sup> 1560B, un test de vieillissement accéléré (test Oddy) a été mené, sous des conditions de 65°C ; 28 jours ; en atmosphère saturée<sup>195</sup>. Conformément à ce qui était attendu, le test ne montre aucun processus de corrosion qui puisse nous amener à douter de la compatibilité chimique de ces matériaux [FIG. 23]<sup>196</sup>.

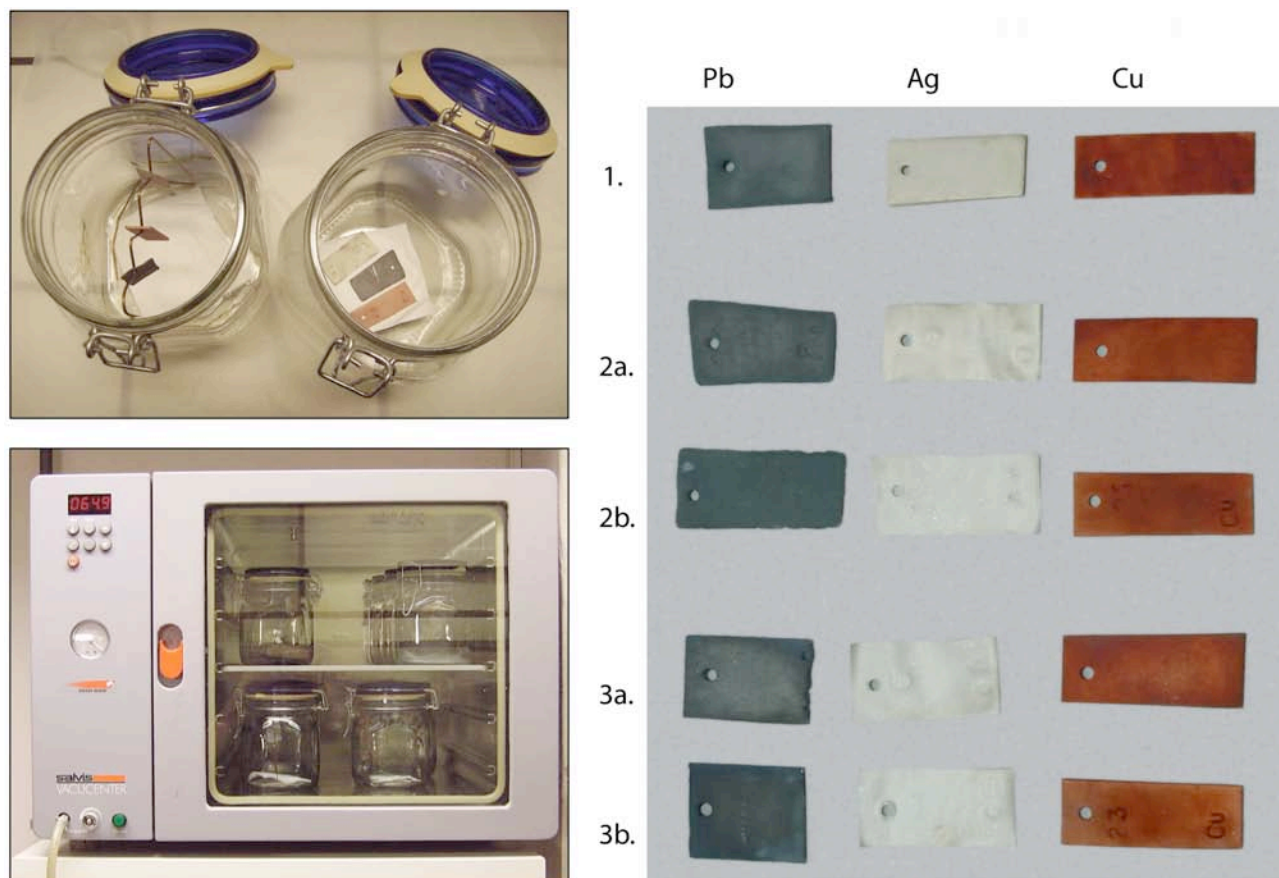


FIG. 23 – Test Oddy – 1. blanc ; 2. Tyvek<sup>®</sup> ; 3. Dermotekt<sup>®</sup> (a. de contact ; b. standard).

## 4.3 Options d'emballage

### 4.3.1 La solution Minigrip<sup>®</sup>

EMBALLAGE DIRECT. Les avantages d'un conditionnement d'un artefact dans un Minigrip<sup>®</sup> sont principalement sa facilité / rapidité d'usage (fermeture zip) et sa transparence : il permet de réaliser un contrôle visuel direct, sans avoir à ouvrir le sachet. Les manipulations successives sont ainsi réduites, sur le terrain comme pour l'étape de documentation à l'arrivée au laboratoire. L'étiquette d'inventaire peut être incorporée directement dans le Minigrip<sup>®</sup>. Le polyéthylène basse densité de ces sachets constitue une barrière à l'humidité suffisante pour l'attente jusqu'au

<sup>195</sup>Green et Thickett, 1995, p.145-146 ; Baker, 1995, p.322 ; Hatchfied, 2002, p.47-48.

<sup>196</sup>Thierry Jacot, discussion du 30 mai 2008.

traitement. Des artefacts imbibés, humides ou secs peuvent être stockés de cette manière pour autant qu'ils ne présentent pas de risque manifeste de rupture<sup>197</sup>.

**SUPPORT.** Pour les artefacts de type A2 (plats et fragiles) une solution simple consiste à disposer la pièce sur un support de polypropylène cannelé [FIG. 24], et de glisser l'ensemble dans le Minigrip<sup>®</sup>. Ce produit<sup>198</sup> se compose de PP extrudé, choisi sans traitement, et existe en différentes épaisseurs / rigidité : nous avons retenu pour le projet les épaisseurs de 3 & 5 mm, qui correspondent à un grammage approximatif de 250 g / m<sup>2</sup>. Les avantages principaux en sont la légèreté et la facilité de découpe pour sa transformation en boîte ou support de dimensions adaptées à diverses situations<sup>199</sup>. Une possibilité parfois intéressante est la réalisation d'ailettes au support afin d'éviter le contact entre le film du Minigrip<sup>®</sup> et la pièce [FIG. 25].

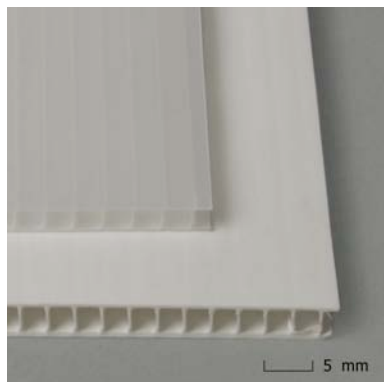


FIG. 24 – Plaques de polypropylène cannelé (Akylux<sup>®</sup>).



FIG. 25 – Exemple d'un support "à ailettes".

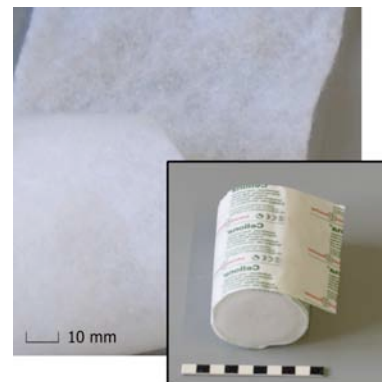


FIG. 26 – Rouleau et texture du Cellona<sup>®</sup>.

**CONTENTION.** Si un artefact paraît d'emblée excessivement fragile / friable, cette solution peut se combiner avec l'utilisation de feutre PES Cellona<sup>®</sup> comme matériel de *cushioning* et de Tyvek<sup>®</sup> comme couche intermédiaire de séparation. Le Cellona<sup>®</sup> est un matériau fibreux qui ne doit pas être utilisé en contact direct avec les artefacts [FIG. 26]. Il n'est pas hygroscopique et ne va donc pas véritablement absorber l'humidité de l'emballage. Toutefois, selon l'état hydrique d'un artefact, il pourra être souhaitable d'ajouter quelques gouttes d'eau dans le Minigrip<sup>®</sup>. Si cette option permet d'immobiliser les fragments, en exerçant sur eux une légère pression, la visibilité au travers de l'emballage en est perdue.

<sup>197</sup>Peacock, 2005, p.572 ; Scott et Grant, 2006, p.11-12 ; Cassman et Odegard, 2007b, p.112.

<sup>198</sup>Commande réalisée par Charlotte Rerolle ; nom du produit Akylux<sup>®</sup> ; Kayzersberg Plastics – DS Smith Plastics Ltd.

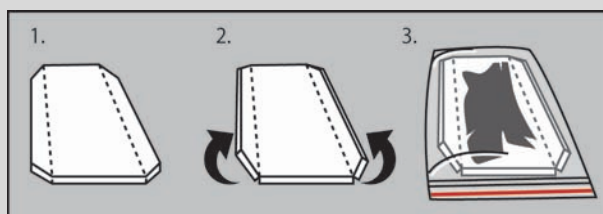
<sup>199</sup>Scott et Grant, 2006, p.28 ; Cameron *et al.*, 2006, p.244.

### Conservation in situ (iii) : emballage et support pour artefacts plats / fragiles

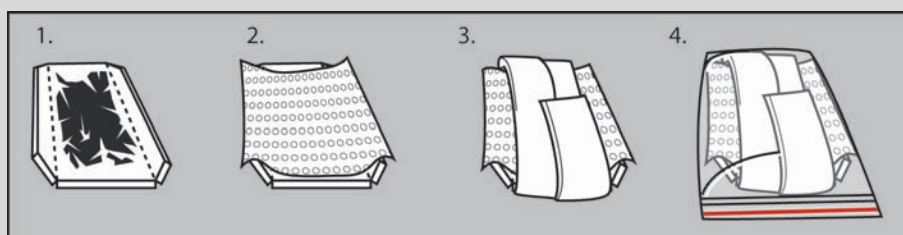
Les pièces de peau / cuir ou de textile sont deux types d'artefacts qui demandent souvent la réalisation d'un support pour pouvoir être emballés (et parfois même prélevés) sans risque de dislocation, rupture, perte de fragments. L'équipement préparé pour le projet comprend :

- 4 plaques de PP cannelé de [0.3 × 0.5 m] (faciles à découper au cutter) ;
- Des supports “à ailettes” prédécoupés pour des Minigrip® de :
  - [11 × 15 cm] → 5 pièces ;
  - [16 × 22 cm] → 3 pièces ;
  - [22 × 30 cm] → 2 pièces.

Les ailettes des plaques prédécoupées peuvent être utilisées ou non, selon les caractéristiques d'un artefact :



Une option pour certains fragments très fragiles, présentant un risque de dislocation évident, est l'utilisation de rouleau de feutre **Cellona®**, qui ne doit toutefois **pas être en contact direct** en raison de sa texture fibreuse : une feuille de **Tyvek®** doit ainsi être insérée entre le fragment et le feutre PES.



Pour le prélèvement, une spatule de pâtissier (acier INOX) constitue un outil approprié pour glisser le support sous une pièce souple.

#### 4.3.2 Le trio Tyvek® / Dermotekt® / film PELD

Pour le maintien de l'hygrométrie est recherché un matériau à caractère hygroscopique. Celui-ci doit permettre d'éviter le dessèchement superficiel d'un artefact déjà sec d'une part, et absorber le surplus de liquide dégagé par une pièce retrouvée dans l'eau de fonte d'autre part. Le but est également d'éviter le recours à un produit naturel tel que le coton ou la fibre de cellulose, qui peuvent eux-mêmes constituer un support / substrat au développement de micro-organismes. Le problème est que les matériaux synthétiques sont généralement plus ou moins hydrophobes et ne peuvent jouer le rôle de matériau tampon, à moins d'augmenter considérablement la surface d'exposition / contact à l'air<sup>200</sup>.

Il existe actuellement sur le marché un grand nombre de produits "superabsorbants" qui vantent les mérites des microfibres. L'acception du terme "microfibres" est plus ou moins variable selon les fabricants<sup>201</sup> : il s'agit de fibres dont la section est de l'ordre du micron et le ratio longueur / largeur supérieur à 300. Les polymères ou co-polymères qui les composent sont nombreux et l'industrie de la microfibre recouvre des domaines divers : des vêtements de sport à la cosmétique, en passant par le nettoyage industriel ou le domaine médical. Pour la présente problématique, la principale difficulté réside dans le fait qu'il s'agit le plus souvent de produits finis : la matière première n'est pas accessible en de faibles quantités ; les composants tenus secrets ; et les produits déjà apprêtés ou mis en forme (ex. : masque ; chiffon ; linge teinté ; etc.).

La solution retenue pour le maintien de l'hygrométrie des artefacts de grandes tailles se base sur l'utilisation d'un linge de pansement médical de feutre PES, le Dermotekt® de W.SÖHNGEN GmbH. Ce produit présente plusieurs avantages : une haute capacité d'absorption (1000 g / m<sup>2</sup>) ; un caractère légèrement flexible / étirable ; la stérilité. Comme le Cellona®, il est fibreux [FIG. 27] ne doit pas être utilisé en contact direct et une couche intermédiaire doit être insérée. Le Tyvek® répond parfaitement à cet usage : le type sélectionné (Tyvek® SOFT 1560B)<sup>202</sup> est perméable à la vapeur d'eau, permettant de ce fait les échanges gazeux au travers de sa membrane ; il est non abrasif et ne peluche pas [FIG. 28].

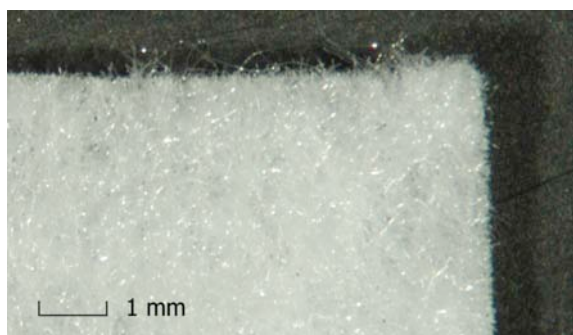


FIG. 27 – Dermotekt® Verbandtuch.

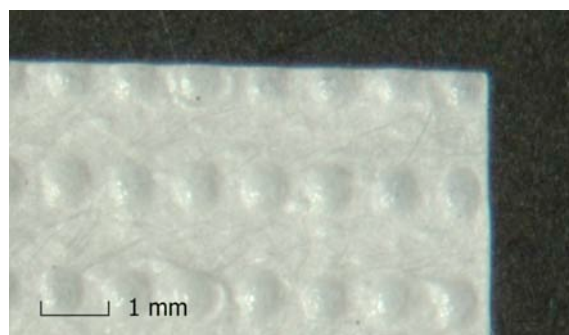


FIG. 28 – Tyvek® SOFT 1560B.

<sup>200</sup>Scott et Grant, 2006, p.12 ; Préserv'Art – site du Centre de Conservation du Québec (CCQ).

<sup>201</sup>La définition standardisée en est une fibre dont le titre est inférieur à 1 décitex (1 gramme pour 10 000 mètres). Petit Robert 2007.

<sup>202</sup>Fournisseur : Avila AG ; CH-8633 Wolfhausen.

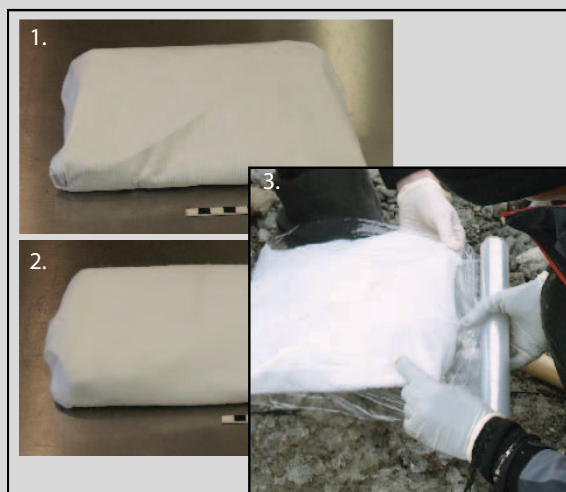


Le Tyvek® est la marque commerciale d'un tissu non-tissé de DuPont™ utilisé dans des domaines variés tels qu'industrie du bâtiment, banderoles d'impression publicitaires, emballages de produits alimentaires ou médicaux, etc. En archéologie, il est notamment employé comme étiquette d'inventaire d'artefacts humides. La conservation-restauration tire profit des propriétés des versions SOFT pour les réalisations d'enveloppes de protection (contre la poussière, la lumière, les insectes), de supports aux textiles et de *pillows* (coussins de calage) notamment. Les produits non-traités sont reconnus comme stables et appropriés à un usage en contact des biens culturels (à éviter : traitements Corona™ ; anti-statiques, ignifuges, etc.)<sup>203</sup>.

### Conservation in situ (iv) : maintien de l'hygrométrie

Un emballage simple (Minigrip®) suffit au maintien de l'humidité pour l'emballage de la plupart des artefacts. Le problème n'est pas tant la dessiccation que d'éviter que l'objet ne baigne dans son emballage. Le maintien de l'état hydrique d'un artefact volumineux est réalisé en trois couches :

1. **Tyvek®** → contact adapté ; tissu imperméable mais respirant. La "fermeture" (ou les replis) sont de préférence réalisés "sous" la pièce, de manière à permettre à l'excès d'eau de s'évacuer rapidement ;
2. **Dermotekt®** → à utiliser très légèrement humidifié (voire sec), selon l'état de découverte d'un artefact ;
3. **Film alimentaire PELD** → barrière finale avec l'environnement : deux couches au minimum.



Tous les artefacts ne nécessitent pas l'usage de la deuxième couche (s'ils sont déjà secs notamment) mais **l'utilisation du film PELD en contact direct** avec un artefact est à proscrire. Les raisons en sont un caractère électrostatique et son adhérence aux surfaces humides.

L'utilisation combinée de bande de feutre PES Cellona® pourra permettre d'assurer la stabilité mécanique de zones / parties sensibles.

<sup>203</sup> Guillemard, 2003, p.38;47 ; Cameron *et al.*, 2006, p.244 ; Owen et Doyle, 2007, p.14 ; Cassman et Odegaard, 2007b, p.115 ; Préserv'Art – site du Centre de Conservation du Québec (CCQ).

### 4.3.3 Protection externe des artefacts longs / volumineux

Les artefacts ne pouvant être contenus dans le caisson de transport devront être fixés sur des sacs à dos. Si le risque d'altération accidentelle (en cas de chute par exemple) est difficile à réduire, plusieurs solutions peuvent limiter de manière efficace les dégradations pouvant résulter de la simple étape de fixation. L'objectif est de prodiguer aux artefacts un soutien mécanique et / ou une protection externe : il était naturel de se tourner vers le domaine médical, qui dispose de tout un panel de produits de contention.

Les solutions retenues proviennent ainsi de l'immobilisation de fractures. Le premier produit est une attelle métallique en acier INOX de la firme Provet AG<sup>204</sup>, utilisé par les vétérinaires pour renforcer le plâtre de fractures chez le gros bétail. Il se présente sous la forme d'une échelle de tiges métalliques soudées [ $1 \times 0.04$  m] qui, tout en étant rigide, dispose d'une grande capacité de déformation : la résilience est difficile à provoquer (voire impossible à atteindre) sans outils. De par sa construction en échelle, l'attelle est avant tout déformable dans l'axe de la longueur, mais une légère torsion reste possible. Ce produit est particulièrement adapté au support d'artefacts longs et cassants [FIG. 29]. La forme en échelle présente l'avantage d'offrir de multiples points d'attache : plusieurs attelles peuvent être assemblées perpendiculairement au moyen de serre-câbles d'électricien, pour former une structure de forme quelconque, facile à maintenir sur un sac, et à l'intérieur de laquelle seront protégés le ou les artefact(s). L'utilisation de Cellona<sup>®</sup> comme matériau de *cushioning* intermédiaire est ici tout à fait indispensable.

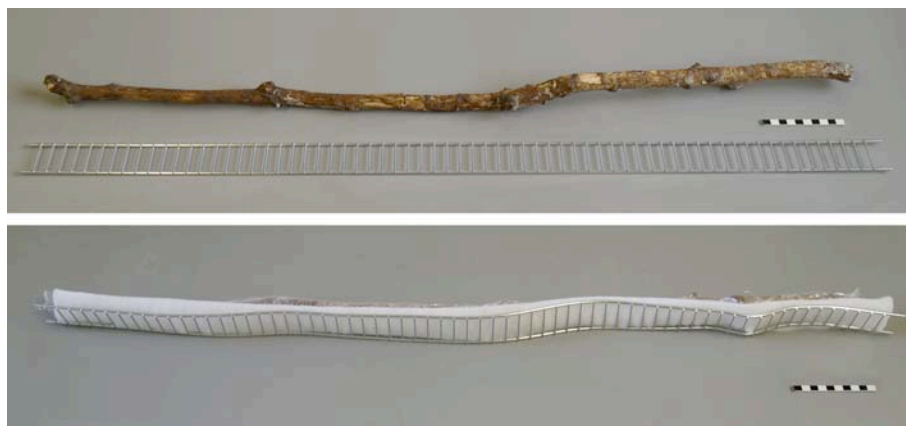


FIG. 29 – Attelle métallique – exemple d'utilisation.

La seconde option provient également du monde vétérinaire : il s'agit d'une bande de plâtre synthétique composée d'un textile de fibre de verre imprégné de résine polyuréthane, commercialisée par 3M<sup>TM</sup>, sous l'appellation de Vetcast<sup>TM</sup> Plus<sup>205</sup>. Les avantages jugés décisifs de ce produit sont :

- Une prise rapide : quelques minutes à température ambiante ; une dizaine de minutes à 3°C ;
- L'adaptabilité de pose : la bande est souple, légèrement étirable / flexible ; elle se replie facilement sur elle-même sans se "soulever" / décoller,

<sup>204</sup>Provet AG (CH-3421 Lyssach) ; produit vendu sous l'appellation de *Cramer-Verband und Fixierschiene extra stark*.

<sup>205</sup>Fournisseur : Heiland Schweiz AG (CH-3421 Lyssach).



FIG. 30 – Vetcast<sup>TM</sup> Plus – exemple d'application.

- Un dégagement de chaleur durant la prise évalué comme très faible ;
- La légèreté : selon la forme et les dimensions à mettre en oeuvre, deux à quatre couches suffisent à la réalisation d'une coque déjà rigide ; le produit est d'ailleurs lui-même de faible densité.

La combinaison de Vetcast<sup>TM</sup> Plus et des attelles métalliques peut offrir une solution de protection externe optimale [FIG. 30]. Dans un souci d'économie du matériau, emporté en quantité limitée, il sera préférable de réaliser en une fois la protection externe de plusieurs artefacts de dimensions similaires ; on pourra ainsi attendre le dernier moment pour mettre en oeuvre ces produits. L'encadré suivant est en anglais : il consiste en des recommandations d'emploi du Vetcast<sup>TM</sup> Plus, telles qu'elles figurent sur une feuille plastifiée qui accompagne l'équipement préparé en vue d'une prochaine mission :

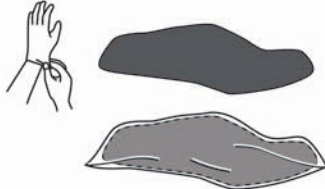





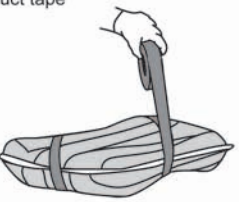


## Conservation in situ (v) : réalisation d'une protection externe

**Vetcast® Plus casting tape**

*To create an external protection for large / fragile artifacts*

- ⚠ - Do not use in direct contact with objects
- External use only (on an already made package)
- Do not wrap around an object - create separate coverings (with plastic film between ; in order to open it easily)
- 💡 - 2-4 successive layers are sufficient (depending upon artefact size)
- If 3 meters of casting tape is long enough for two coverings (one for both side), divide the roll in two parts before soaking.
- Use in combination with PES fleece cushioning material (Cellona®) / metal splint / Corrugated plastic board (Akylux®) / plastic film and "duct tape"
- 🕒 PU resin impregnated fiberglass ; hard in ≤ 10 minutes ; elasticity / conformability during application ; lightweight.

1. Preliminary: create an appropriate package  

2. Protect with Cellona® PES-fleece (cushioning material)  

3. Application of Vetcast® Plus IN SHELL(S)  
 - DO NOT WRAP AROUND AN OBJECT  

4.  10 minutes
5.  180°
6. If necessary, repeat steps 2-4 on the other face (or use corrugated plastic board (Akylux®))  

7. Fix the shells together with "duct tape"  


### 4.3.4 Documentation

La documentation des artefacts relève du domaine de l'archéologie et non de la conservation-restauration. Cependant, il pourra s'avérer avantageux, au moment du choix du traitement, de disposer d'informations précises quant à l'état de découverte d'un artefact (conditions générales, état hydriques, faiblesses constatées lors du prélèvement, etc.). La connaissance du type d'emballage réalisé et des matériaux mis en contact avec un artefact pourra également

constituer des données utiles pour les analyses des matériaux constitutifs d'un artefact ou celles de résidus superficiels. Aussi, l'équipement préparé comprend-il différents outils de documentation (stylos, marqueurs, supports d'écriture et dictaphone numérique).

#### 4.3.5 Et pour une momie ?

La présence d'une momie dans la portion restante du banc de glace du Schnidejoch a évidemment fait l'objet de nombreuses spéculations. Toutefois, de nombreux indices laissent supposer que la découverte du cadavre de "Schnidi" est improbable. Si tel n'était pas le cas, ou si un corps momifié était découvert en un autre lieu, la première recommandation serait alors d'éviter à tout prix le dégel. Selon le Prof. Eric Crubézy, la première intervention consiste à recouvrir le corps de glace, pour réfléchir aux possibilités de transport. Pour ce dernier, une méthode consiste à réaliser un caisson dans des panneaux synthétique en Styron® (Polystyrène extrudé) à combler de neige / glace pour maintenir la chaîne du froid<sup>206</sup>. Une couverture de survie renforcée (OrionReflex®), qui pourrait alors servir à ralentir la fonte de la zone, et une grande pièce de Tyvek® [1.5 × 2 m] font partie du matériel emporté. Le Tyvek® pourrait ici constituer une barrière entre la glace déjà à proximité du corps et celle ajoutée.

### 4.4 Synthèse

Les solutions présentées ici découlent de nombreuses contraintes : les matériaux retenus ne sont pas "parfaits" et certains ont un coût relativement élevé (Dermotekt® et Vetcast™ Plus notamment). Les choix relèvent avant tout de compromis réalisés dans l'objectif de s'adapter à un maximum de situations. La plupart des solutions envisagées ici se basent sur l'utilisation de polymères et l'option d'une première couche d'emballage par une feuille d'aluminium n'a pas été développée, en raison d'un contact jugé, non sans *a priori*, comme peu adapté. Il s'agit pourtant du matériau recommandé pour prévenir la contamination en cas d'analyses biochimiques. Un rouleau de papier d'aluminium fait partie de l'équipement emporté et je laisse le conservateur-restaurateur qui accompagnera une prochaine expédition juger, en fonction des cas rencontrés et en discussion avec l'archéologue, de son utilisation.

Les simulations réalisées (non décrites ici) montrent que les matériaux sélectionnés répondent bien à la (aux) fonctionnalité(s) recherchée(s). Néanmoins, les tests sont entrepris en fonction des buts à atteindre, ce qui biaise d'entrée de jeu le caractère d'adaptabilité face à une situation réelle, cette dernière ne correspondant pas toujours à des *scenarii*.

---

<sup>206</sup>Dr. Eric Crubézy, entretien téléphonique du 06 juillet 2007.

## 5 Stockage in situ et transport

« *Proper storage is one of the most direct ways of contributing to preventive care.* »

(Cassman, V. et Odeggaard, N., 2007b, p.103.)

Une des particularités de ce projet de conservation *in situ* réside dans l'éloignement du site : pour rejoindre ce dernier, une marche d'environ 3 heures est nécessaire. Pour les artefacts découverts, la randonnée de retour comporte des risques évidents de vibrations, tassements, chocs légers – voire violents, une perte d'équilibre n'étant pas à exclure sur les sentiers alpins.

Cette partie décrit les étapes de conceptualisation et réalisation d'un caisson isotherme destiné au stockage *in situ* et à l'acheminement des artefacts du site au laboratoire. La fonction de ce caisson est (i) la protection physique des artefacts ; (ii) le maintien de températures proches de 0°C, pour la prévention du développement de micro-organismes (cf. point 2.5, p.49). Les autres thèmes abordés ici sont : le système de calage interne ; les solutions de stockage *in situ* et d'apport de froid ; la préparation de l'ensemble de l'équipement sur des *Lastenkraxe*. Mais avant cela, il me faut introduire ici quelques notions physiques qui constituent la base théorique de la réalisation du caisson d'isolation thermique.

### 5.1 Transferts thermiques : quelques notions de base

L'étude des phénomènes de transfert thermique relève de la thermodynamique, qui est l'une des branches de la physique. L'*énergie interne* d'un corps (solide, liquide ou gazeux) consiste en la somme de l'*énergie cinétique* de ses constituants (molécules, atomes et électrons libres). La température ( $T$  en degrés Kelvin [ $K$ ] ou  $\Theta$  en degrés Celsius [ $^{\circ}C$ ]) est un paramètre d'état thermodynamique qui traduit à l'échelle macroscopique l'état énergétique (ou énergie cinétique) de la matière<sup>207</sup>.

LA CHALEUR. La chaleur se définit comme l'énergie d'un corps communiquée à un autre corps en raison d'une différence de température. Il s'agit d'un transfert d'énergie thermique, ou *transfert thermique*, symbolisé par la lettre  $Q$  avec le Joule [ $J$ ] pour unité. La quantité de chaleur  $\Delta Q$  transmise dans un intervalle de temps  $\Delta t$  correspond à un *flux thermique* ( $\dot{Q}$ ) :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [J/s = W] \quad (2)$$

---

<sup>207</sup>L'ensemble de cette section est rédigée sur la base de deux ouvrages : le premier est un manuel de physique : *Physique générale – Mécanique et thermodynamique*, de Giancoli 2002 ; le second traite le sujet de manière plus directe : *Transferts thermiques* de Bianchi et al. 2004. Je dois souligner ici qu'étant donné la complexité du sujet, seules les parties introductives de chapitres particuliers de cet ouvrage sont utilisées. Par ailleurs et surtout, l'explication des phénomènes physiques exposés repose sur les conseils, explications et démonstrations des professeurs Eric Bovet et François Goetz.

CHALEUR SPÉCIFIQUE ET CHALEUR LATENTE. L'énergie requise pour modifier la température d'un corps est proportionnelle à la masse ( $m$ ) de ce corps ainsi qu'à sa *chaleur spécifique* ( $c_p$ ), paramètre caractéristique de la matière dont il se compose :

$$Q = mc_p \Delta T \quad (3)$$

L'unité de la chaleur spécifique est le Joule par kilogramme de matière et par unité de température [ $J/(kgK)$ ].

A titre d'exemple, à 20°C et à pression constante de 1 atm, la chaleur spécifique de l'eau est  $c_p \cong 4182 J/(kg K)$  ; celle de l'air  $c_p \cong 1004 J/(kg K)$  ; du granit  $c_p \cong 920 J/(kg K)$  ; de l'acier  $c_p \cong 450 J/(kg K)$ .

Les changements de phase nécessitent un apport supplémentaire d'énergie pour le passage *solide*  $\rightarrow$  *liquide*  $\rightarrow$  *gaz*, et libèrent une énergie équivalente en parcours inverse. Cette quantité d'énergie est nommée *chaleur latente de fusion* ( $l_F$ ) pour le passage de l'état solide à l'état liquide et *chaleur latente de vaporisation* ( $l_V$ ) entre une phase liquide et gazeuse. L'unité en est le Joule par kilogramme [ $J/kg$ ]<sup>208</sup>.

Les trois modes fondamentaux de transfert thermique sont la *conduction*, la *convection* et le *rayonnement*.

### 5.1.1 Conduction

La conduction est la propagation de la chaleur par contact direct des particules d'un corps (ou entre des corps) de températures différentes. Il s'agit de la transmission du mouvement des particules (molécules, atomes ou électrons libres d'un métal) aux particules avoisinantes. Ce processus de transfert thermique tend à l'équilibre thermodynamique, soit à l'uniformisation de la répartition de l'énergie cinétique. Si l'on considère un solide de géométrie simple, le transfert thermique par conduction est proportionnel à la différence de température entre deux extrémités du corps ( $T_1$  et  $T_2$ ), ce qui s'exprime par l'équation :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda A \frac{T_2 - T_1}{s} \quad (4)$$

où :  $\lambda$  est le *coefficient de conductivité thermique* du matériau [ $W/(mK)$ ] ;  
 $A$  l'*aire* (surface ou section) considérée [ $m^2$ ] ;  
 $s$  l'*épaisseur* du matériau [ $m$ ].

La conduction thermique d'un matériau est ainsi caractérisée par sa *conductivité thermique* ( $\lambda$ ) (parfois également nommé *coefficient de conductivité thermique*). C'est là un des critères principaux pour le choix d'un bon *isolant*, qui se définit par un  $\lambda$  faible, et s'oppose à un matériau dit *conducteur* [Tab. 3]<sup>209</sup>.

---

<sup>208</sup>Giancoli, 2002, p.473-478 ; Bianchi *et al.*, 2004, p.2-3; 8; 11; 534-539.

<sup>209</sup>Pache, 1996, p.19 ; Giancoli, 2002, p.482-483 ; Bianchi *et al.*, 2004, p.4; 13; 534-539.

Substance	$\lambda$ [ $W/(mK)$ ]
Acier	50 – 60
Verre	0.8 – 1.0
Eau	0.56
Bois	0.08 – 0.16
Air	0.023

TAB. 3 – Coefficients de conductivité thermique ( $\lambda$ ) de quelques substances.

La valeur relative de  $\lambda$  permet d'expliquer des phénomènes de sensation thermique tels que le caractère "froid" au toucher d'un métal, qui conduit la chaleur bien plus rapidement qu'un bois (dans lequel l'énergie transmise par nos doigts reste en surface). A relever encore que le flux thermique se crée dans le sens de la température la plus élevée vers la plus basse<sup>210</sup>.

### 5.1.2 Convection

La convection est le mode de transmission thermique dominant chez les fluides, qui sont pour la plupart de mauvais conducteurs. La convection consiste en un mouvement de masse de molécules et résulte de l'échange d'énergie entre un fluide en contact avec une surface de température différente, ou entre des zones de températures différentes (soit de masses volumiques différentes) d'un même fluide. Le mouvement d'un liquide mis à chauffer en représente l'exemple classique ; le vent ou les courants marins sont des exemples de convection naturelle à grande échelle.

L'étude des processus de convection est un domaine complexe qui relève à la fois des transferts thermiques et de la mécanique des fluides. Nous nous bornerons dans ce travail à introduire le *coefficient de transfert (ou d'échange) thermique* ( $k$ ) parfois également nommé "facteur  $k$ ". Il s'agit d'une fonction complexe qui implique un grand nombre de variables, et qui traduit les *conditions aux limites*, soit les transferts entre un corps et son milieu environnant. La loi de Newton établit la relation entre un corps de température  $T_c$  et son environnement  $T_e$  telle que :

$$\dot{Q} = k(T_c - T_e) \quad [W/m^2] \quad (5)$$

Le coefficient  $k$  constitue une mesure de l'intensité de transfert thermique entre la surface d'un corps et son milieu extérieur (un fluide). Ce paramètre prend en compte les effets conjugués de conduction, convection et rayonnement thermique.<sup>211</sup>

### 5.1.3 Rayonnement

Le rayonnement thermique est une forme particulière de transfert thermique en ce sens qu'il ne nécessite pas la présence de matière pour sa transmission. Il consiste en transfert radiatif et a pour origine l'agitation atomique de la matière superficielle d'un corps. « Le transfert de chaleur par rayonnement suppose l'existence d'un émetteur de

<sup>210</sup>Giancoli, 2002, p.482-483.

<sup>211</sup>Giancoli, 2002, p.484 ; Bianchi *et al.*, 2004, p.28 ; 132-133.

rayonnement, d'un espace dans lequel le rayonnement se propage et d'un récepteur sur ou dans lequel le rayonnement est transformé. » (Bianchi *et al.*, 2004, p.235.) L'essentiel de la chaleur qui nous parvient devant un radiateur électrique ou un feu de cheminée est de l'énergie rayonnée. Toute matière dont la température est supérieure au zéro absolu émet un spectre d'ondes électromagnétiques qui forme sa signature. Les physiciens ont constaté que le taux d'émission d'énergie rayonnée est proportionnelle à la 4<sup>e</sup> puissance de leur température en kelvin :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4 \quad (6)$$

où :  $e$  est le *pouvoir émissif* [-] ;

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann [ $W/(m^2 K^4)$ ].

La **constante de Stefan-Boltzmann** ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ ) intervient pour exprimer la relation entre température et rayonnement électromagnétique d'un *corps noir*<sup>212</sup>, lequel est toujours supérieur à celui d'un corps de forme semblable, quel qu'en soit le matériau. Le facteur  $e$ , ou *pouvoir émissif*, est une valeur comprise entre 0 et 1 particulière à chaque substance. Ce paramètre nous intéresse ici car il exprime également la capacité d'un matériau à *absorber* le rayonnement thermique (tel que celui émis par le soleil). Les matières noires / sombres ont un facteur  $e$  qui tend vers 1 à l'opposé des matières claires à surface brillante (lisse), au pouvoir émissif proche de zéro, qui reflètent le rayonnement thermique et n'en absorbent ainsi qu'une faible part<sup>213</sup>.

Dans la plupart des cas, les trois modes de transmission de chaleur (conduction, convection et rayonnement) s'additionnent, même si en certaines circonstances, l'un ou l'autre joue un rôle à ce point dominant que les seconds peuvent être négligés, simplifiant l'analyse du cas étudié<sup>214</sup>.

## 5.2 Un caisson isotherme : concept & réalisation

Le concept du caisson isotherme repose sur l'axiome de la protection physique : il s'agit de réaliser une boîte rigide, solide. Ses dimensions et le système d'immobilisation interne doivent être adaptés au transport d'artefacts archéologiques fragiles. La principale contrainte est le poids, qu'il s'agit évidemment de limiter.

Une idée initiale est de disposer d'un système d'apport de froid pour la partie motorisée du transport. Le concept est ici de réaliser un second couvercle pour le même caisson, auquel est incorporé un système de régulation thermique, solution qui permet de limiter les manipulations : il ne sera ainsi pas nécessaire de transférer l'ensemble des artefacts à cette étape intermédiaire du transport.

---

<sup>212</sup>Un *corps noir* est un modèle physique qui sert de référence au rayonnement des corps réels Bianchi *et al.*, 2004, p.242.

<sup>213</sup>Giancoli, 2002, p.484-485 ; Bianchi *et al.*, 2004, p.5-6 ; 235-236.

<sup>214</sup>Giancoli, 2002, p.482 ; Bianchi *et al.*, 2004, p.4.

### 5.2.1 Dimensions

La définition de la forme et des dimensions du caisson s'est avérée être problématique, influencée par de nombreuses contraintes. Le but est de fixer le caisson sur une structure de sac à dos, un *Lastenkraxe* de chez Tatonka® ayant très vite été reconnu comme la solution toute désignée [FIG. 31]. La première limitation en dimension est alors la longueur : pour des raisons d'ergonomie, celle-ci ne doit pas excéder de manière trop importante la largeur du corps humain, sous peine de se cogner les coudes dans le caisson à chaque pas, ce d'autant que la randonnée alpine avec des charges importantes se fait généralement à l'aide de bâtons de marche. De même, il ne paraît pas souhaitable que la largeur soit trop importante, décalant ainsi le centre de gravité du porteur vers l'arrière et le contraignant à évoluer voûté. Finalement, le caisson ne doit pas occuper à lui seul l'ensemble du volume de charge potentiel, une quantité importante de matériel devant également être acheminée, pour l'emballage des artefacts notamment.

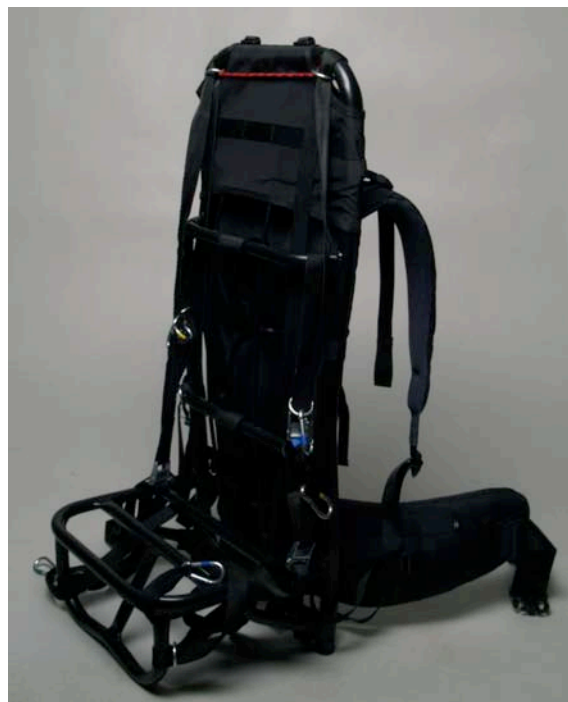


FIG. 31 – Tatonka® *Lastenkraxe*.

**VOLUME REQUIS.** La question du volume “optimal” n'est pas évidente : l'observation des dimensions des artefacts découverts lors des campagnes de fouilles précédentes ne peut servir que d'indication. Il ressort de cette dernière que la grande majorité des objets et fragments retrouvés sont de petite taille, n'excédant que rarement une trentaine de centimètres dans plus d'une dimension. Toutefois, plusieurs fragments de bois sont allongés, et présentent une longueur pouvant atteindre ou dépasser le mètre (hampes de flèche ; carquois et arcs entre autres). Si des pièces de dimensions similaires devaient à nouveau être découvertes, elles pourraient alors être fixées verticalement sur les *Lastenkraxe*, au moyen des solutions décrites dans la section 4.3.3, p.80.

**DIMENSIONS RETENUES.** Pour des questions de stabilité au cours du transport, un stockage horizontal paraît offrir la solution la plus sûre, pour autant que l'on puisse limiter le poids des artefacts disposés les uns sur les autres (les questions de compartimentation et de calage interne sont détaillées dans la section 5.3.2, ci-dessous). Aussi, faudra-t-il positionner à plat le plus grand nombre possible de pièces, ce qui permet de choisir la longueur comme paramètre de base. Celle-ci est limitée par les questions d'ergonomie évoquées ci-dessus. Nous pouvons l'estimer à 45 cm au maximum, desquels il faudra soustraire l'épaisseur des parois. La largeur maximale a ensuite été estimée à 35 cm, et la hauteur définie à 55 cm.

### 5.2.2 Choix des matériaux

« L'isolation thermique représente une direction d'action sur le transfert thermique global opposée à son intensification. » (Bianchi *et al.*, 2004, p.446). Cette "direction d'action" consiste en fait à augmenter la résistance thermique ( $R_{th}$ ) [ $K/W$ ] qui, en faisant appel à l'analogie thermoélectrique et à partir des équations (4) et (5), peut s'exprimer sous la forme :

$$R_{\text{él}} = \frac{U}{I} \qquad R_{th} = \frac{s}{A\lambda} \qquad \text{ou} \qquad R_{th} = \frac{1}{k} \qquad (7)$$

où :  $R_{\text{él}}$  est la résistance électrique en ohms [ $\Omega$ ];

$U$  la tension en volts [ $V$ ];

$I$  l'intensité en ampères [ $A$ ];

les autres paramètres sont déjà connus.

Le coefficient de conductivité  $\lambda$  étant un paramètre spécifique à un matériau [TAB. 4], les possibilités d'augmentation de la résistance thermique sont : (i) augmenter l'épaisseur  $s$ ; (ii) diminuer la surface  $A$ ; (iii) limiter le coefficient  $k$ .

Matériaux	$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	$\lambda$ [ $W/(mK)$ ]
Laine de verre	10–25	0.056–0.030
Laine de roche	18–140	0.047–0.032
Fibres de cellulose	25–50	0.043–0.039
Polystyrène expansé	15–30	0.039–0.034
Mousse de Polyuréthane	25–45	0.036–0.023

TAB. 4 – Coefficients de conductivité thermique de quelques matériaux isolants de faible densité

Les meilleures performances d'isolation thermique sont obtenues par vide partiel ou par insertion dans une cloison de gaz tel que l'argon, le krypton ou le xénon, qui présentent des  $\lambda$  inférieurs à celui de l'air et qui sont par exemple utilisés dans certains doubles vitrages. Cependant, les options de réalisation d'un vide partiel ou d'insertion d'un gaz sont d'emblée rejetées en raison de difficultés techniques évidentes d'une part, et du supplément de poids (pour la création de cloison solides et étanches) qui en résulterait d'autre part<sup>215</sup>.

<sup>215</sup>Pache, 1996, p.62; Bianchi *et al.*, 2004, p.39; 539; du Bois et de l'Ameublement, CTBA, p.3.



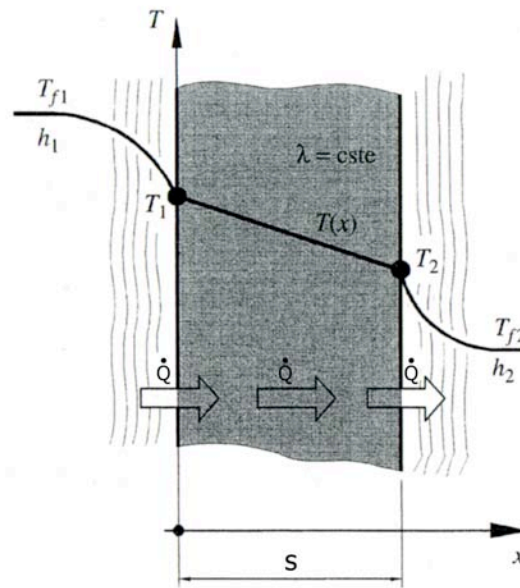


FIG. 32 – Conduction thermique stationnaire dans un mur simple en contact avec deux fluides.

Pour ce projet, les critères de choix de l'isolant sont ainsi :

- Conductivité thermique du matériau  $\lambda$  (qui caractérise l'isolation thermique d'un matériau donné) ;
- Densité du matériau ;
- Mise en oeuvre / possibilité de travail de la matière : il ne s'agit pas de commander la fabrication d'une boîte, mais bien de la réaliser dans un atelier équipé de machines et outils standards.

LE MULTI-COUCHES. Un aspect intéressant de l'équation (5) pour appréhender un transfert thermique est qu'elle prend en compte l'*interface* entre un corps solide et le milieu environnant (gaz ou liquide). La figure [FIG. 32] montre une courbe de température telle qu'elle se comporte à cette limite. Nous avons alors :

$$\dot{Q} = k(T_1 - T_2) \quad [W/m^2] \quad \text{avec} \quad k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [W/(m^2K)] \quad (8)$$

où :  $\alpha_1 ; \alpha_2$  sont les coefficients de convection  $[W/(m^2K)]$ .

L'efficacité d'un multi-couches se base sur la démultiplication des occurrences de ce coefficient  $\alpha$  pour augmenter la résistance thermique d'un ensemble :

Solide homogène

Multi-couches (x : nbre de couches ; i : propre à une couche)

$$R_{th} = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad R_{th} = \frac{1}{\alpha_1} + \left[ x \left( \frac{s_i}{\lambda_i} \right) + (2x - 2) \left( \frac{1}{\alpha_i} \right) + (x - 1) \left( \frac{s_{air}}{\lambda_{air}} \right) \right] + \frac{1}{\alpha_2} \quad (9)$$

Pour illustrer ce propos, considérons l'application numérique d'une paroi en polystyrène expansé (PSE) de 5 cm d'épaisseur (coefficient de conduction  $\lambda = 0.034$ ) en comparaison à un trois couches de 1 cm d'épaisseur chacune du même matériau, disposées sur 5 cm. Le coefficient de conduction de l'air est  $\lambda = 0.023$  ; Le coefficient de convection  $\alpha$  de la surface d'un matériau quelconque dans l'air *immobile* est de  $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  :

PSE 5 cm

$$R_{th} = \frac{1}{6} + \frac{0.05}{0.034} + \frac{1}{6} \cong 1.80 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

"Tri-couches" PSE (3 couches de 1 cm sur 5 cm)<sup>216</sup>

$$R_{th} = \frac{1}{6} + 3 \cdot \frac{0.01}{0.034} + 4 \cdot \frac{1}{6} + 2 \cdot \frac{0.01}{0.023} + \frac{1}{6} \cong 2.75 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

L'option du multi-couches se devait ainsi d'être testée, non pas par une division d'un matériau en deux ou trois couches, mais par la superposition du plus grand nombre de couches possible pour une épaisseur donnée. Les options testées ont été réalisées sur l'exemple des matériaux d'isolation de comble et toitures dans le bâtiment, par la superposition de couches de film aluminisé maintenues séparées par un feutre PES, des couches de mousse PE ou de perles de PSE. Les résultats n'ont toutefois pas permis de démontrer par la mesure une efficacité supérieure des multi-couches en terme d'isolation thermique<sup>217</sup>. C'est cependant pour d'autres raisons que cette option a été éliminée : d'une part les difficultés techniques de mise en oeuvre d'un multi-couches pour un volume fermé à couvercle, qui implique un grand nombre de frontières / jonctions entre les couches, d'autre part une fois encore le besoin de rigidité du caisson, et les contraintes de poids qui y sont associées.

PROTECTION PHYSIQUE ET RÉFLEXION. La solution retenue doit beaucoup à une visite chez *Suter SwissComposite Group* à Jegenstorf (BE), entreprise spécialisée, comme son nom l'indique, dans les matériaux composites : elle travaille essentiellement avec divers textiles synthétiques de fibres de carbone, de fibres de verre, de kevlar, dont la rigidité est obtenue par imprégnation de résines thermodurcissables, le plus souvent des époxydes. Un entretien avec M. Rolf Suter, au cours duquel ont été discutées les possibilités de réalisation techniques d'un caisson à la fois léger et résistant, a fait ressortir le besoin d'un support rigide entre des coques interne et externe : une fois observée les différentes caractéristiques de dimensions / volume requis, il est apparu évident que la contrainte de poids ne pourrait être respectée que par l'utilisation d'une âme isolante elle-même rigide, et renforcée par deux à trois couches de fibres de verre, apparaissant comme le matériau le plus adapté et d'un bon rapport qualité / prix. Dans le cas d'une âme isolante non rigide, l'épaisseur nécessaire à la stabilité physique peut être estimée à près du double, ce qui multiplie d'autant le poids des coques. Faisant toute confiance aux conseils d'une équipe habituée à travailler sur des planeurs, des kayaks et autres modules aux contraintes physiques autrement primordiales, la cause était pour moi entendue : une isolation rigide renforcée de couches de fibre de verre s'imposait.

Parmi les produits que propose le *Suter SwissComposite Group*, deux types de fibres de verre ont été retenus : un tissu standard d'un grammage de 280 g/m<sup>2</sup> (Köper n°92125) et du Texalium® (Hexcel ; 290 g/m<sup>2</sup>). Le second

<sup>216</sup>Cette démonstration m'a été présentée par M. Eric Bovet, entretiens des 24 mai et 09 août 2007.

<sup>217</sup>Les tests mis en oeuvre à cette étape de réflexion ont été effectués au moyen du matériel didactique de la Haute Ecole Arc d'ingénierie du Locle, mis à ma disposition par M. François Goetz. Ce matériel s'est toutefois avéré inadapté à la mesure de la résistance thermique d'échantillons peu conducteurs et de plusieurs cm d'épaisseur (le facteur correctif équivalait à près de 85-95% de la mesure et invalide ainsi les résultats).

produit est un composite fibre de verre / aluminium qui, de par sa brillance, dispose en théorie d'un faible pouvoir émissif (cf. point 5.1.3). Il n'est utilisé ici que pour la couche finale. Sur les conseils du personnel de l'entreprise, la résine d'imprégnation est une R&G Epoxy-L<sup>218</sup> ; <sup>219</sup>.

ISOLANT. Parmi les matériaux d'isolation à la fois rigides et légers, seul le polystyrène expansé est facile à mettre en oeuvre : il se laisse découper à l'aide d'un fil chaud et poncer au papier de verre. Bien qu'incompatible avec la plupart des solvant organiques, le PSE résiste au contact avec les résines thermodurcissables. Ce matériau est bon marché et disponible en grande surface. Mon choix s'est porté sur du SwissporEPS 20<sup>220</sup> d'une densité de 20 kg/m<sup>3</sup> et au  $\lambda$  de 0.038 W/(mK).

L'isolation thermique est directement dépendante du  $\lambda$ , de l'épaisseur et de la surface. Ainsi, une forme arrondie aura pour avantage de diminuer la surface d'échange. En outre, la solidité globale en est accrue. Cela étant, la gestion de l'espace pour le stockage implique de maintenir un volume de géométrie générale quadrangulaire. De même, si une épaisseur maximale constitue évidemment une meilleure isolation, celle-ci doit être limitée en raison des contraintes ergonomiques susmentionnées et de la nécessité de conserver un volume interne cohérent. L'épaisseur a ainsi été déterminée à quatre centimètres et seuls les angles et arêtes ont été arrondis, avec un congé interne de 3 cm pour la base et de 5 cm pour les arrêtes verticales et le couvercle [FIG. 33].

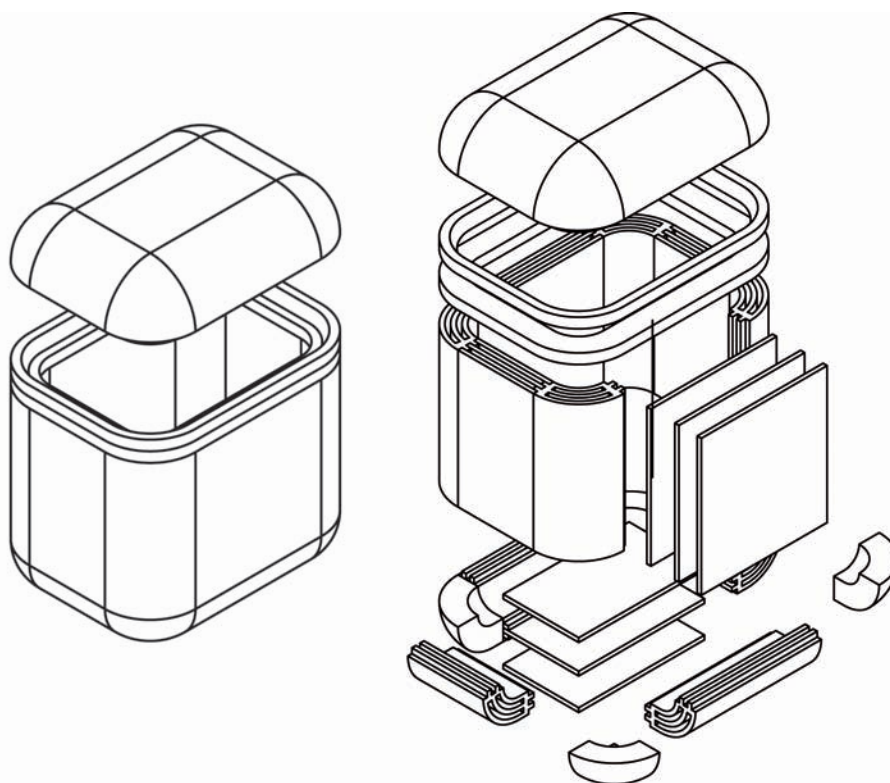


FIG. 33 – *Modèle général du caisson isotherme – vue simple et partiellement éclatée.*

<sup>218</sup>Rapport de mélange résine / durcisseur de 100 :40 ; prise en 40mn ; durcissement en 20h.

<sup>219</sup>Rolf Suter, discussion du 06 août. 2007.

<sup>220</sup>Fournisseur : Bauhaus (CH-3172 Niederwangen).

L'application numérique de démonstration de l'avantage du multi-couches en terme de résistance thermique n'a pas été choisi au hasard : il s'agit là de la solution finalement retenue : trois couches de PSE de 0.8 cm chacune, réparties sur quatre centimètres d'épaisseur. Le SwissporEPS 20 a ainsi été choisi en trois épaisseurs : 8 mm (pour les faces), 20 mm (pour la fermeture) et 100 mm (pour les angles et arrêtes).

Le concept final est un caisson aux angles arrondis, réalisé à partir d'une âme en PSE de 4 cm d'épaisseur, elle-même divisée en trois couches, et renforcée de couches de fibre de verre et de Texalium® pour la couche finale. La jointure entre la base et le couvercle a été réfléchi de manière à freiner le transfert thermique, par un profil en escalier, permettant l'application d'un double joint d'isolation. Si ce concept peut se résumer en quelques phrases, la réalisation a quant à elle nécessité plusieurs semaines !

### 5.2.3 Réalisation

Parallèlement au développement du concept, il est essentiel de réfléchir aux possibilités de réalisation technique et à l'espace nécessaire. L'atelier de l'ADB est vaste et j'ai ainsi pu y occuper (et bloquer temporairement) plusieurs plans de travail. Une première table a servi de base à l'improvisation d'un module de découpe du polystyrène ; d'autres surfaces sont également nécessaires aux principales étapes de réalisation qui sont :

1. La découpe du PSE ;
2. L'assemblage des éléments ;
3. L'application des couches de fibres de verre, puis de Texalium® ;
4. La réalisation du joint d'isolation du couvercle ;
5. Le système de fermeture de la boîte.

DÉCOUPE ET ASSEMBLAGE. L'installation du fil à chaud s'effectue par la création d'un arc électrique : le type de fil employé a une résistance de  $8 \Omega/\text{m}$  et doit être utilisé à  $2.5 \text{ A}$ <sup>221</sup>. L'atelier de l'ADB possède un chargeur de batteries de 13.8 V/10 A, qu'il a été possible de convertir à cet usage. Une simple règle de trois permet d'établir que la longueur nécessaire est alors de 0.69 m, longueur qu'il est possible de faire varier selon la température désirée. La structure de support est improvisée à partir du matériel à disposition, qui ne manque pas dans cet atelier [FIG. 34]<sup>222</sup>.

Une fois l'installation mise au point, la découpe du PSE est relativement aisée, tout comme l'est l'assemblage des pièces. Ce dernier est réalisé au moyen d'une résine époxyde à prise rapide (Devcon® 30-Min)<sup>223</sup> [FIG. 35]. Dans chacun des espaces a été insérée une pochette de Rubingel® (Zeochem®) dans le but d'éviter la condensation, qui influencerait négativement la capacité d'isolation du prototype.

---

<sup>221</sup>Fournisseur : *Suter SwissComposite Group* ; Article : *Schneidedraht* 10 m ; 0.4 mm.

<sup>222</sup>Conseils techniques : M. David Cuendet, laboratoire de conservation-restauration du Musée d'Archéologie et d'Histoire du canton de Vaud, discussion téléphonique du 27 juillet 2007 ; M. Peter Liechti, responsable de l'atelier de l'ADB.

<sup>223</sup>*Suter SwissComposite Group*.



FIG. 34 – Installation de découpe du PSE – A relever la présence du ressort de tension qui permet la réalisation de coupes propres, évitant de répercuter la moindre interruption de mouvement.



FIG. 35 – Caisson isotherme – Ame isolante & Etape de collage.

RENFORT DE FIBRE DE VERRE. La réalisation des coques internes et externes demande un temps considérable, du fait de la durée du durcissement de la résine d'une part, mais surtout de la nécessité de procéder en étapes successives, sur des zones d'étendues limitées. La patience est ici de rigueur, tout mauvais collage se traduisant par de fastidieuses heures de ponçage (porter un masque). Une option non employée, mais à laquelle je réfléchirais pour tout prochain travail de ce type, est l'utilisation de sacs et pompe à vide, qui permettrait de réaliser le collage simultané sur un plus grand nombre de faces, tout comme d'éviter la très mauvaise surprise d'un tissu s'étant soulevé durant la nuit...

A cette étape sont introduites entre les couches des segments de sangles en PP, effilés en leurs extrémités, pour y insérer des anneaux métalliques destinés à la future fixation du caisson.

FERMETURE. Le choix définitif du type de joint d'isolation repose sur une thermographie d'un module de test. Le principe en est une boîte isolante avec, monté sur une face, les matériaux / systèmes d'isolation testés. A l'intérieur de la boîte sont disposées des plaques eutectiques qui génèrent un flux thermique, et dont l'intensité en différentes zones est révélée par la thermographie infrarouge (cf. point. 5.4, ci-après). Le résultat est ainsi direct, mais avant tout proportionnel et donc comparatif. Il donne le Silastic® 3482 comme légèrement supérieur, relativement à d'autres joints autocollants d'isolation du bâtiment (portes et fenêtres) disponibles sur le marché

Le système de fermeture du caisson est externe et réalisé à partir de boucles "clip" et de sangles de PP [FIG. 36]. A leurs intersections, les sangles sont maintenues par des anneaux d'étanchéité de caoutchouc dits "O-Ring". Les travaux de couture sont effectués par *Vrenis Woll- und Nähstübli* (CH-3018 Bümpliz). Le matériel "de finition" (sangles, boucles, anneaux métalliques, etc.) provient des magasins *Migros DO-IT* et *Gobag Gummi Oberleitner* de Berne.



FIG. 36 – Caisson isotherme – Texalium® ; système de fermeture ; détail de la fermeture du couvercle.

Au final, le caisson isotherme pèse 3.3 kg à vide, pour un volume de 33 litres. Reste alors entière la question de l'efficacité...

### 5.3 Tests, usage et modules complémentaires

#### 5.3.1 Efficacité

Les tests de l'efficacité de l'isolation sont avant tout comparatifs. Ils se basent sur la mesure de l'évolution des températures internes et externes (milieu), suite à un écart initial imposé, au moyen de *datalogger*, disposés dans mon prototype et dans une glacière commerciale (Camping Gaz® ; aimablement mis à ma disposition par M. Markus Detmer du Laboratoire de conservation de l'ADB). Cette étape est essentielle pour la mise en perspective des concepts théoriques des transferts thermiques exposés en introduction de cette partie : le test le plus parlant est mené à vide, sans apport de froid. Le modèle de chez Camping Gaz® est de construction classique, composé d'une couche isolante en mousse PU et de coques de PP ; son volume est de 26 litres, pour un poids de 2.7 kg. Les deux caissons sont disposés dans une chambre froide pour être ensuite amenés à température ambiante (ici 23°C environ) [FIG. 37].

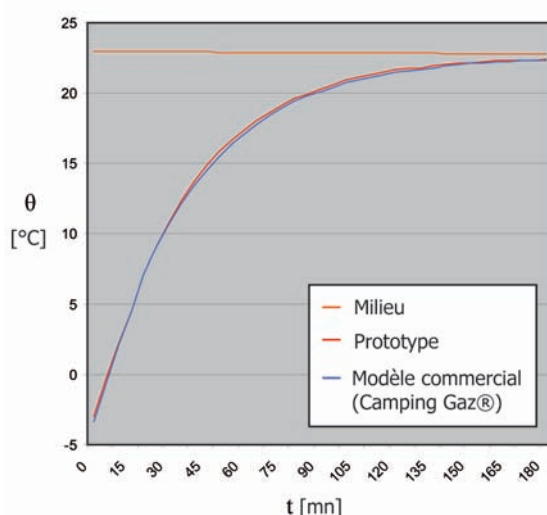


FIG. 37 – Test comparatif de l'isolation thermique – A vide.

Le prototype réalisé égale donc les performances du modèle commercial, résultat relativement décevants selon mon point de vue. L'intérêt est ici d'observer la courbe, dont la forme reflète le flux thermique, proportionnellement à l'écart de températures, selon l'équation 2. Il faut également constater que l'évolution est extrêmement rapide : une quinzaine de minutes pour le passage de 0° à 10°C ; une quarantaine pour l'intervalle 0-20°C.

D'autres tests, menés au soleil, montrent les courbes se transformer en quasi droites, qui rejoignent en flèche la température du milieu : 15 mn pour le passage 0-20°C du modèle commercial contre 18 mn pour le prototype. La surface réfléchissante a ainsi un effet qui, s'il peut être considéré comme dérisoire, ne doit pas faire oublier que le maintien de basses températures se base avant tout sur un système d'apport de froid.

Le graphique de la figure 38 est le résultat de l'apport de froid de trois plaques eutectiques (Ezetil®IceAKKU, gel réfrigérant, de 445 g chacune). Le comportement correspond à un équilibre entre la source de froid et les pertes thermiques : on y constate premièrement qu'un équilibre est atteint au bout de 2h30 environ. Cette première zone



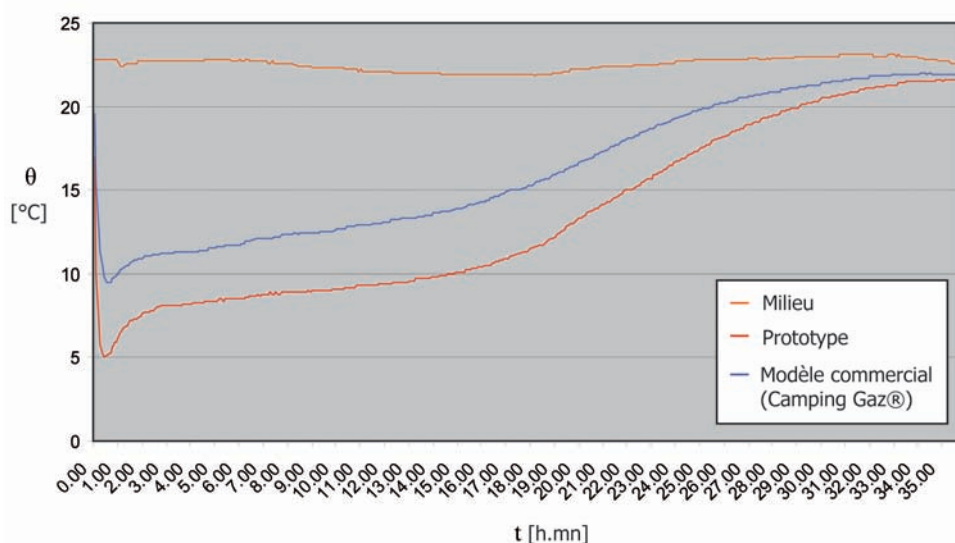


FIG. 38 – Test comparatif de l'isolation thermique – Apport de froid de trois plaques eutectiques (à vide).

découle vraisemblablement du fait que le gel eutectique a alors une température inférieure à son point de fusion : l'équilibration de l'énergie cinétique ne parvient pas à compenser le flux de chaleur vers l'extérieur des caissons. L'énergie latente de fusion du gel, sur le principe duquel repose l'efficacité de telles plaques, n'est sollicitée qu'à partir de deux ou trois heures. Les plaques ont ensuite une efficacité quasi constante pendant une quinzaine d'heures, suite à quoi la perte reprend ensuite le dessus. L'écart observé entre les courbes de température du prototype et du modèle commercial a été observé sur plusieurs tests menés avec des plaques eutectiques. Il peut avoir plusieurs causes : l'éloignement des *datalogger*, fixés dans les caissons à une hauteur approximative, ou des plaques eutectiques de différentes températures : le temps de refroidissement peut être variable, le personnel du laboratoire utilisant également ces plaques. On peut aussi émettre l'hypothèse que les qualités de gel seraient inégales, les plaques n'ayant pas toutes été acquises par l'ADB en un seul achat.

Il ne sera toutefois pas nécessaire de transporter des plaques eutectiques sur le site : la glace / neige constitue également une source de froid très efficace. Présenter ici d'autres tests "à vide" n'apporterait pas d'informations pertinentes, le caisson étant fondamentalement destiné au transport d'artefacts, et le système de *cushioning* interne doit être pris en compte dans les mesures.

### 5.3.2 Cushioning interne

La solution retenue pour l'immobilisation des artefacts à l'intérieur du caisson consiste premièrement en étagers amovibles, au nombre de trois, et ajustables en hauteur. Ceux-ci sont réalisés dans des plaques de PP cannelé, maintenues par des bandes de Velcro® (3M™ Dual Lock™) [FIG. 39]. Pour un poids réparti de manière homogène, les étagers se sont avérés pouvoir supporter une charge de 10 kg (non testé au-delà).



FIG. 39 – *Étages amovibles – Détails de la fixation.*

Le système de *cushioning* s'inspire d'une boîte pour le conditionnement de restes ostéologiques, développée au *Burke Museum* de Washington. Entre les os et le couvercle est inséré un *pillow*, coussin de calage constitué d'une enveloppe de Tyvek® rembourrée de feutre PES (Cassman et Odegard, 2007b, p.122). Cette solution apparaît ici toute désignée, du fait qu'elle est (i) *modulable*, des *pillows* de différentes tailles pouvant être répartis en fonction des zones à protéger et se replier sur eux-mêmes ; (ii) *complémentaire aux étagères amovibles*, à partir desquels sera exercée la pression de maintien souhaitée. Certains des *pillows* incluent des perles de PSE, pour une épaisseur moyenne 3-5 cm. Ceux-ci ne sont pas totalement remplis, de manière à permettre le déplacement des perles : les *pillows* s'adaptent ainsi aux formes des objets à protéger [FIG. 40].

FIG. 40 – *Système de cushioning – Étages et pillows.*

Il est apparu souhaitable de disposer d'un module de rassemblement des artefacts de petites tailles, afin de ne pas avoir à les manipuler un à un, au moment où est découvert un artefact de plus grande dimension (qui doit alors être placé au fond du caisson). Une autre raison en est le risque de disposer en contact des objets de grandes et de petites tailles, les premiers risquant d'endommager les seconds<sup>224</sup>. Ce module est réalisé à partir des mêmes matériaux (Tyvek® matelassé de feutre PSE) et comprend une fermeture à Velcro® qui permet d'en ajuster la taille [FIG. 41].

<sup>224</sup>Cassman et Odegard, 2007b, p.112.



FIG. 41 – Sac à Minigrip®

Pour chaque étage ont été réalisés un minimum de deux *pillows* : l'un avec, l'autre sans perles de PSE. Trois autres de ces éléments (dont deux de taille inférieure), sont également inclus au caisson, de manière à protéger les côtés d'un artefact de grande taille. Il est à relever ici que le volume de stockage est ainsi réduit de près de moitié ! L'ensemble est toutefois très léger et entièrement modulable.

Les tests pratiques de ce système, basés sur des chocs légers, secousses et multiples retournements du caisson, ont révélé un déplacement minime des "artefactiques" ; ils me permettent d'avancer ici que l'objectif de *cushioning* est atteint. Ce système s'est également avéré être un excellent isolant thermique, ce qui n'est plus un but recherché.

### 5.3.3 Systèmes d'apport de froid

SYSTÈME PASSIF : GLACE ET NEIGE. Les différentes tentatives de standardisation du maintien de basses températures avec de la neige, plus ou moins fraîche / vieille n'ont pas permis d'obtenir des résultats entièrement reproductibles [FIG. 42]. Une des raisons en est le manque de matière première qui, même en hiver, n'est que trop rarement disponible à Berne. Les tests réalisés reposent dans chacun des cas sur la répartition d'un kilogramme en quatre sachets de 250 g (disposés à chacun des étages). Ils dévoilent de grandes variations en fonction de l'éloignement du *datalogger* et des sachets de neige : au cours d'une même mesure, des écarts de température pouvant atteindre une dizaine de degrés °C ont été constatés entre la base et les étages supérieurs du caisson.

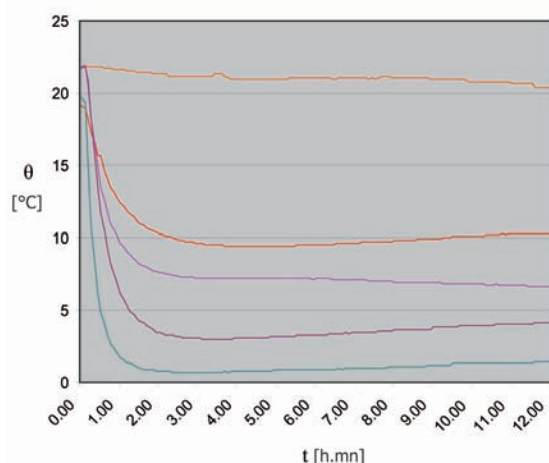


FIG. 42 – Tests de maintien de basse température à partir de neige – système de cushioning inclu.

Si aucune des courbes ne résulte d'un contact direct, il est évident que l'épaisseur des *pillows* (tout comme les replis des tissus, les espaces d'air entre les étages) influencent les mesures. Lorsqu'il s'agira d'artefacts, la température de ces derniers, ainsi que l'énergie de chaleur massique de leurs matériaux, constitueront d'autres variables. Quoiqu'il en soit, il paraît nécessaire d'insérer la plus grande quantité de neige possible.

**LE GAZ CARBONIQUE.** Parmi les options d'apport de froid testées figurent également des systèmes dynamiques. La première consiste en la tentative d'utilisation de gaz carbonique. Il existe sur le marché, des bouteilles de dioxyde de carbone (température d'ébullition à  $-78^{\circ}\text{C}$ ) de petite dimension, ce qui permettait d'envisager une possibilité de réalisation d'un module d'apport de froid d'un poids total inférieur à 5kg. L'idée n'était évidemment pas d'exposer le mobilier archéologique au flux de  $\text{CO}_2$ , et ce système d'échange thermique devait se faire par l'intermédiaire d'un tube métallique (du cuivre pour le prototype, d'aluminium en cas de concrétisation). L'ensemble du matériel [FIG. 43] fut généralement mis à ma disposition par Messieurs Jean-François Muller et Ulrich K. Salzmann de l'entreprise Carbagas AG (CH-3097 Liebefeld).

L'expérience a toutefois démontré que l'idée était irréaliste, du moins sous cette forme : une ouverture qui consomme près de 200g de  $\text{CO}_2$  ne permet d'abaisser la température qu'à  $12^{\circ}\text{C}$ , et ce uniquement à proximité di-



FIG. 43 – Couvercle de test de l'option du gaz carbonique.

recte du tube. En outre, le retour à l'équilibre thermique (22.5°C, température du milieu) est d'autant plus rapide que le métal constitue ensuite un pont thermique, ce qui démontre par la même occasion qu'aucune glace carbonique ne s'est formée à l'intérieur de celui-ci.

SYSTÈME PELTIER. La seconde option peut se définir comme : « Profiter d'une action commerciale pour acquérir deux glacières électriques ; les démonter ; en extraire les éléments techniques pour les réunir ensuite en un seul module. » C'est pourtant la manière la plus économique de procéder<sup>225</sup>. Il s'agit de glacières électriques d'entrée de gamme de la marque Ezetil<sup>®</sup>, qui se branchent sur allume-cigare (12V).

En fonction et à vide, ce modèle permet de maintenir des températures de l'ordre de 5°C [FIG. 44]. Une fois les deux éléments peltier montés en parallèle dans un seul couvercle et pour des conditions similaires, une trentaine de minutes suffisent à atteindre des températures négatives ! Il s'est ainsi avéré nécessaire de réguler l'efficacité de ce module, ce qui a été fait au moyen d'un thermostat numérique ecoTRONT de JUMO<sup>226</sup> [FIG. 45]. Cette solution permet ainsi de choisir la plage de température à maintenir : les limites de la consigne en ont été fixées à -5 et 10°C. Cette option n'est toutefois pas parfaite : pour l'arrêt / remise en fonction des éléments peltier, le thermostat se base sur les données transmises par une sonde, laquelle est une mesure ponctuelle. De plus, le système de ventilation ne permet pas la création d'un flux d'air entre les étages.

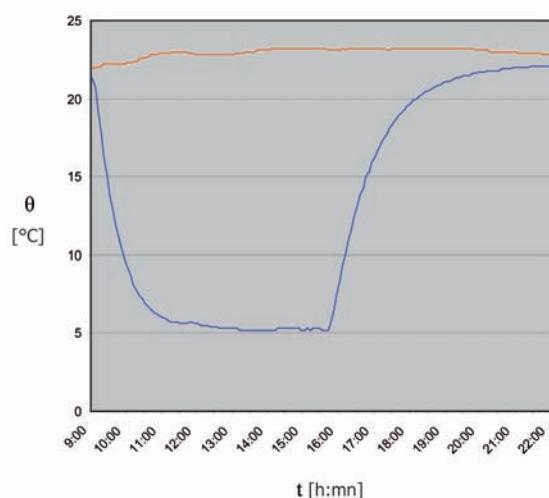


FIG. 44 – Glacière électrique Ezetil<sup>®</sup> en fonction.

Ainsi, s'il est possible de maintenir une température uniforme "à vide", les problèmes d'isolation interne déjà évoqués demeurent entiers. Les mesures de la figure 46 ont été réalisées au cours d'un trajet de départ en week-end de neige : le but était ici de démontrer la possibilité de conserver à l'état gelé des échantillons de bois, pour un trajet entre des points A et B<sup>227</sup>, ici entre Berne et le Val d'Anniviers (VS).

<sup>225</sup>Concept et achat Ch. R. v. B. ; Conseils techniques de réalisation : M. Peter Liechti.

<sup>226</sup>Fournisseur : Conrad Electronic AG ; commande en ligne.

<sup>227</sup>Et oui, une fois arrivé il faut encore chauffer le chalet...

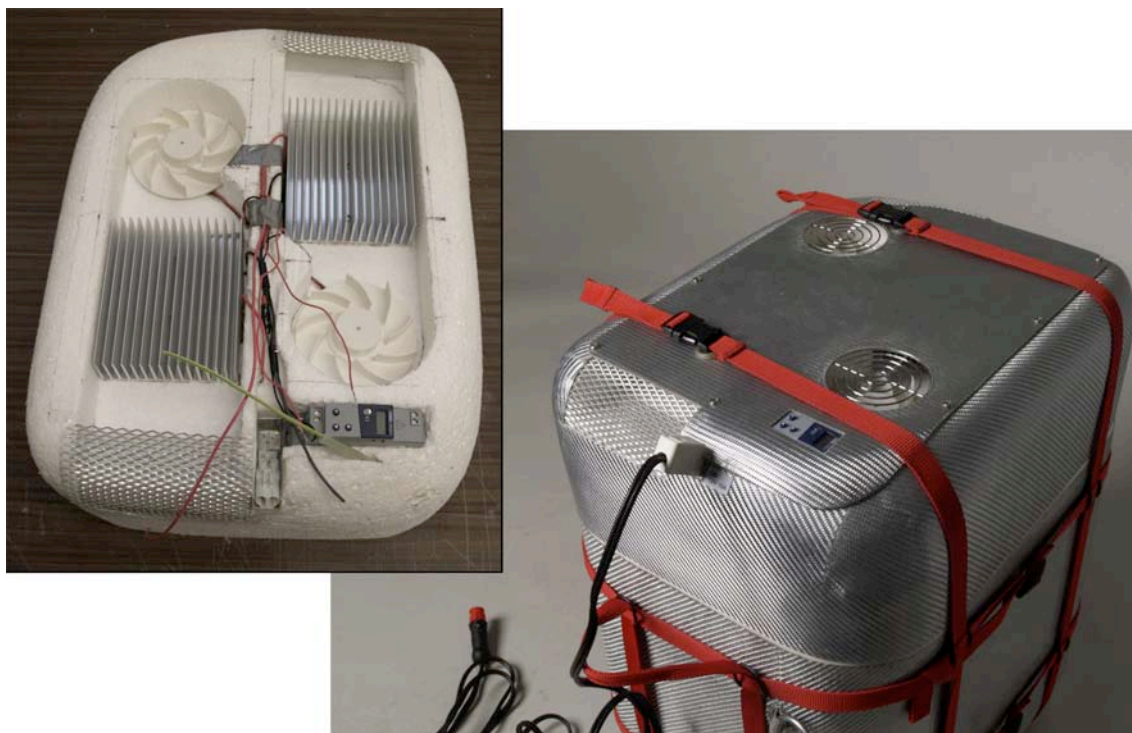


FIG. 45 – Second couvercle incluant deux éléments peltier montés en parallèle – étape de réalisation et résultat final.

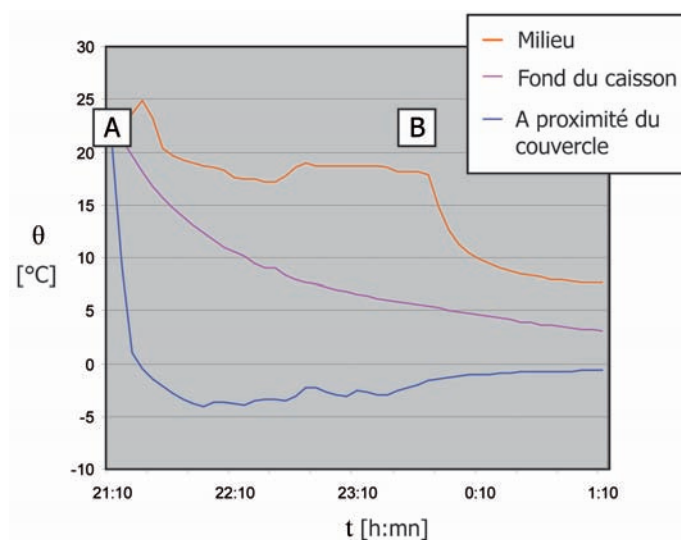


FIG. 46 – Second couvercle en fonction (lors d'un trajet) – Échantillons de bois gelés + trois plaques eutectiques, maintenus par des pillows entre deux étages; premier datalogger déposé sur l'ensemble; second datalogger trois pillows et une vingtaine de cm plus bas.



## 5.4 Bilan thermique

L'étude de l'isolation dans le domaine du bâtiment s'effectue par thermographie, technique qui permet d'enregistrer le rayonnement infrarouge de façades ou toitures pour y détecter les pertes thermiques. Le meilleur moment pour réaliser celle-ci est le petit matin, lorsque les températures fraîches offrent un "contraste" thermique optimal. La figure est réalisée par Monsieur Ueli Fritz, professeur à la HKB, qui a très aimablement accepté de venir à l'ADB pour consacrer quelques heures à l'observation du caisson au moyen d'une caméra infrarouge. Le principe est ici de détecter les zones froides, dans un environnement chaud. Les résultats ont dépassé toute attente, mettant en évidence les transferts thermiques avec une définition qui permet de caractériser les faiblesses du caisson et de critiquer ainsi plusieurs des choix effectués.

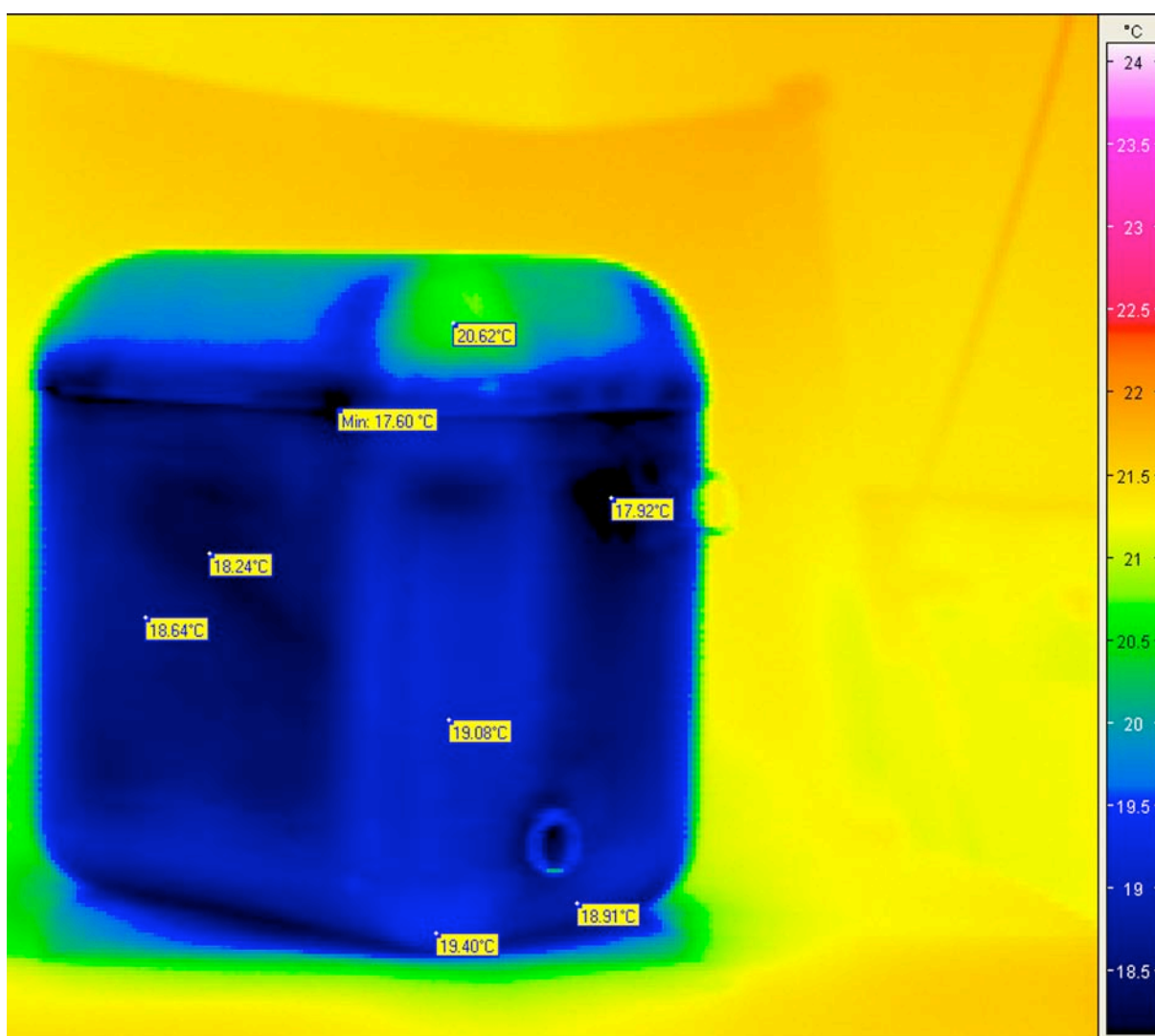


FIG. 47 – Thermographie du caisson.

Relevons tout d'abord que le minima de température se situe au niveau de la fermeture, ce qui était prévisible. On observe ensuite sur chacune des faces des taches sombres, qui correspondent aux sachets de Rubingel® inclus dans la construction, et qui forment ici des ponts thermiques entre les couches. Étonnement, les jointures des différents

éléments de PSE n'y sont que peu visibles, même celles réalisées sans "escaliers" (comme le collage situé 2 cm sous la fermeture du couvercle). Ces résultats remettent en cause la plupart de mes choix (tri-couche; Rubingel®; bref, les "améliorations" que je pensait apporter), mais s'avèrent également très prometteurs pour l'analyse comparative de matériaux et systèmes isolants<sup>228</sup>.

Le premier objectif étant de disposer de points de comparaison pour les options retenues, sur les conseils de M. Fritz un module [FIG. 48] de test a été réalisé avec :

- ① La solution du tri-couches telle qu'elle a été appliquée pour le caisson (Rubingel® en contact avec les deux couches);
- ② Produit dessiccateur disposé de manière à n'être en contact qu'avec une seule couche;
- ③ Tri-couches sans Rubingel®;
- ④ PSE de 4 cm d'épaisseur, qui constitue la référence.

Je souhaitais également tester un multi-couches "véritable", tel qu'il aurait pu être mis en oeuvre entre des coques solides, avec les contraintes de rigidité qui s'y associent : le besoin de points d'appui (⑦) et les jointures entre couches pour un volume fermé (⑧). Pour le module de test, sont compris, entre deux couches de PSE de 8 mm d'épaisseur chacune une alternance de :

- ⑤ 17 × film aluminisé / 18 × feutre PES;
- ⑥ 17 × film aluminisé / 18 × mousse PE;
- ⑦ 17 × film aluminisé / 18 × PSE;
- ⑧ Le film aluminisé est coupé sur chacune des dix-sept couches, puis recollé au moyen d'un ruban adhésif de feuille d'aluminium.

Il ressort de la thermographie, les conclusions générales suivantes :

- La pire option est un tri-couches sans agent dessiccateur;
- Un tri-couche avec Rubingel® n'est pas fondamentalement meilleur qu'une couche de PSE homogène;
- Les multi-couches véritables sont comparativement supérieurs en termes d'isolation.

Cette analyse indique que les choix réalisés ne sont pas aussi mauvais que ne le laissait croire la première thermographie du caisson. Sur la figure [FIG. 47], l'observation des angles (réalisés en plein) montre les températures les plus hautes, ce qui n'implique pas une meilleure isolation. L'explication en est la forme arrondie, pour laquelle une surface interne correspond à une surface externe de dimension près de trois fois supérieure. Les arêtes présentent également des températures plus élevées que celles des faces : elles sont pourtant réalisées sur le même modèle. L'option d'un véritable multi-couches aurait vraisemblablement offert de meilleures performances, mais aurait demandé un temps de travail (encore) supérieur et éventuellement entraîné un supplément de poids (toutefois difficile à estimer).

---

<sup>228</sup>Ueli Fritz, conservation-restauration et professeur à la HKB; Caméra infrarouge : JENOPTIK VARIOSCAN 3021-ST (Laser Optik System GmbH); logiciel de traitement d'image; IRBIS control V2.2 (©1998 InfraTec GmbH); Thermographies réalisées à l'ADB le 15 octobre et 12 décembre 2007.

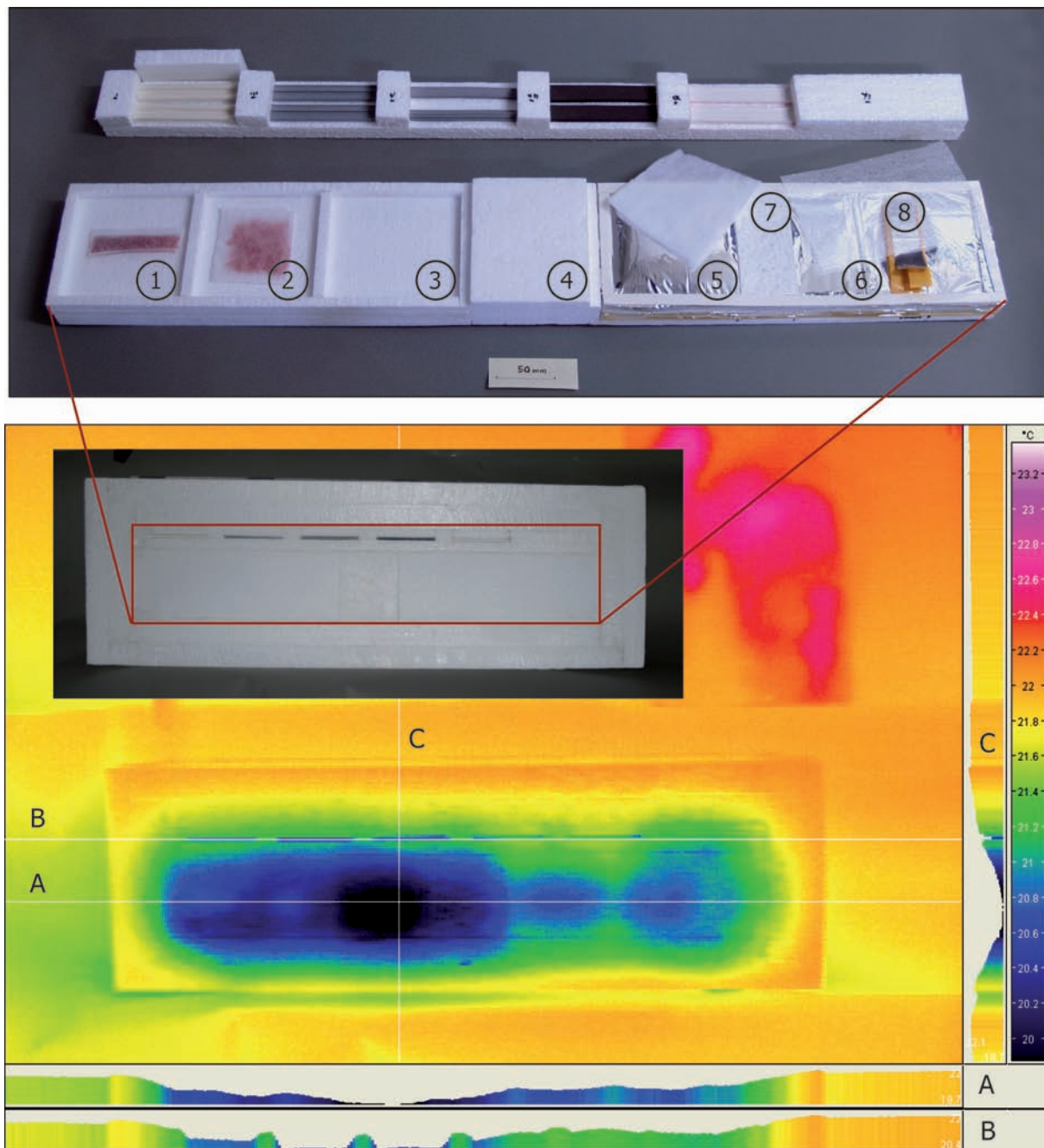


FIG. 48 – Thermographie du module test.



Il est toutefois vrai que des performances similaires auraient pu être atteintes par le simple achat d'un modèle commercial. C'est avant tout l'utilisation adéquate du caisson qui déterminera les températures maintenues : il convient par exemple de ne pas exposer inutilement une glacière au soleil.

### **Conservation in situ (vi) : maintien de basses températures**

Au regard du risque de prolifération de micro-organismes, les conditions de stockage optimales sont considérées comme devant être inférieures à 4°C. Sur le site peuvent être appliquées les mesures suivantes :

- Disposer des sachets de glace / neige dans le caisson, à proximité directe des artefacts (les sachets sont de préférence dédoublés, en opposant les fermetures) ;
- Placer le caisson dans une dépression de la glace (pré-existante ou à creuser).
- Recouvrir la cavité de la couverture de survie OrionReflex®.

Il convient avant toute chose d'éviter l'exposition au soleil du caisson.

Pour le transport, utiliser des sachets de glace / neige fraîchement rechargés. En cas d'immobilisation au soleil, il sera avantageux de recouvrir le caisson d'un tissu imbibé d'eau (réduction considérable des pertes thermiques).

Pour la partie motorisée du trajet : → Utilisation du second couvercle à refroidissement thermoélectrique avec les étapes :

1. Introduire la sonde sur l'artefact le plus proche ;
2. Brancher sur l'allume-cigare ;
3. Enclencher le contact du véhicule ;
4. Régler la température du thermostat sur 0°C.

## 5.5 Bilan pondéral

Comme répété à maintes reprises au long de ce document, le poids est l'une des contraintes principales de ce projet de terrain, l'objectif étant la sélection et la préparation du matériel de conservation nécessaire sur un site d'altitude. Il est donc logique de terminer ici par une liste de poids qui constituent un premier bilan de ma contribution.

Le sac Tatonka® Barrel "S" (45 litres; 1.205 kg) qui regroupe l'ensemble du matériel et outil d'emballage [FIG. 49] a été choisi pour ses caractéristiques de robustesse et d'imperméabilité. Il possède dans l'une de ses poches des bretelles amovibles qui permettent, au besoin, de le transporter au dos.



FIG. 49 – Tatonka® Barrel "S" et matériel de conservation in situ.

### ① Outils de documentation [420 g]

- Dictaphone numérique Olympus® VN-2100PC (+ piles neuves);
- Support d'écriture;
- Etiquettes PP;
- Marqueurs permanents; crayon gris; stylos;
- Flèche Nord / échelle; boussoles;
- Flèche d'étiquette.

### ② Gants et protection [605 g]

- 20 × Masques respiratoires;
- 20 × Paires gants latex non poudrés taille M;
- 20 × Paires gants latex non poudrés taille L.

### ③ Equipement emballage – 1 [1695 g]

- Minigrip® :
  - [9 × 11 cm] – 20 pièces;
  - [11 × 15 cm] – 15 pièces;
  - [16 × 22 cm] – 20 pièces;
  - [22 × 30 cm] – 5 pièces.
- Plaques de PP cannelées prédécoupées :
  - [11 × 15 cm] → 5 pièces;
  - [16 × 22 cm] → 3 pièces;
  - [22 × 30 cm] → 2 pièces.
- Tyvek® 1560B – 4 × [1.5 × 0.75 m];
- Tyvek® 1560B – 1 × [2 × 3 m];
- Rouleau film PELD;
- Rouleau de papier d'aluminium.

④ **Équipement emballage – 2** [1425 g]

- Dermotekt® – 3 × [1.2 × 0.8 m];
- Vetcast™ Plus – 3 × [3.6 m × 7.5 cm];
- Vetcast™ Plus – 2 × [2.7 m × 12.5 cm];
- Cellona® – 4 × [0.1 × 3 m];
- Rubant adhésif “duct tape”;
- Récipient imbibation Vetcast™ Plus.

⑤ **Outils emballage** [505 g]

- Ciseaux INOX;
- Cutter;
- Scalpel + lames neuves;
- Spatules INOX;
- Brucelles PP;
- Ethanol / Kleenex® / pipettes.

⑥ **Éléments de fixation** [390 g]

- Diverses solutions (en plus du “duct tape”), pour fixer les artefacts sur les Tatonka® Lastenkraxe.

⑦ **Trousse de secours montagne** [285 g]

⑧ **N'entrant pas dans le sac Tatonka®**

**Barrel “S”** (et donc fixé sur le Lastenkraxe)

- Plaques de PP cannelées  
4 × [0.3 × 0.5 m] → [4 × 90 g];
- Attelles INOX 3 × [0.04 × 1 m] → [3 × 230 g];
- Attelles INOX 4 × [0.04 × 0.5 m] → [4 × 115 g].

Au total, l'équipement de conservation pèse 7.125 kg; le caisson isotherme (matériel de *cushioning* et étages compris) 4.230 kg; et une fois fixés sur le Tatonka® Lastenkraxe de 3.175 kg, nous atteignons 16.05 kg. Il sera encore nécessaire d'ajouter à cette charge déjà conséquente, l'équipement personnel du marcheur, boisson et ravitaillement, pour finalement y inclure, peut-être au retour, les artefacts découverts (et donc également de la neige!). Je souhaite ici courage au futur porteur.



FIG. 50 – Matériel de conservation, Lastenkraxe® et sherpa.

## Discussion

Arrivé au terme de ce travail, il semble évident que plusieurs des facettes abordées auraient pu à elles seules constituer le sujet d'un projet de recherche. Je pense notamment ici à la détermination de l'état de préservation / dégradation de l'ensemble des matériaux organiques ou d'un matériau particulier ; à la sécurisation des indices archéologiques ; ou encore au maintien de l'hygrométrie au sein d'un emballage. Par ailleurs, la conceptualisation et réalisation d'un caisson isotherme relève évidemment des compétences de l'ingénieur plutôt que de celles du conservateur-restaurateur. Néanmoins, ces divers aspects sont interconnectés et il ne me paraît pas inutile des les avoir considérés comme un tout, même si certains aspects s'en trouvent traités de manière quelque peu légère. Cela dit, les thèmes présentés au travers de ce document me paraissent former un ensemble cohérent de solutions pratiques, bien que plusieurs points doivent encore être soulignés :

(i) La partie consacrée à la sécurisation des indices archéologiques soulève la diversité du potentiel informatif et aboutit à certains critères de sélection pour les matériaux d'emballage. La particularité d'un site tel que le Schnidejoch est qu'il y est *a priori* difficile de déterminer l'âge d'un artefact, avant qu'ait lieu une investigation archéologique, qui implique elle-même un certain nombre d'intervenants. Les opérations de conditionnement interviennent très tôt dans le processus global qui entoure les artefacts. Aussi, les mesures et précautions nécessaires doivent être déterminées avant même que ne soit révélé le besoin de mise en oeuvre d'une analyse. Les recommandations relevées au cours de mes recherches doivent ici être considérées comme des *mesures minimales*, parfois évidentes, et ne répondent à aucun "standard" particulier. J'insiste ici sur le fait que seule une *coopération permanente* avec les chercheurs et spécialistes est pertinente.

(ii) Les solutions proposées pour l'emballage correspondent avant tout à des besoins constatés ou supposés des matériaux organiques issus de la glace, ce pour plusieurs "types" d'artefacts. Divers cas de figures et circonstances de découverte ont été envisagés, pour chercher à déterminer les matériaux d'emballage les mieux adaptés. A partir des paramètres et critères de sélection retenus, j'ai eu ici le sentiment que les alternatives étaient peu nombreuses. Quoi qu'il en soit, les choix se sont portés sur des matériaux que j'estime être de qualité et qui, en plus de répondre à un besoin particulier, peuvent être utilisés en diverses circonstances.

Un temps considérable a été consacré à leur sélection (procuration d'échantillons, recherche de fournisseurs proches ou concurrentiels et tests préliminaires), si bien qu'au final, le temps nécessaire à la mise en place de tests systématiques s'en est trouvé considérablement réduit. La difficulté de telles simulations découle en partie de l'inconnue qu'est l'état hydrique des matériaux au moment de leur découverte. Aussi, une certaine aptitude de jugement sera nécessaire au conservateur-restaurateur présent sur le site pour évaluer le degré de saturation en eau d'un artefact et choisir l'option d'emballage adéquate.

(iii) L'aspect de la protection physique des artefacts est également un point pour lequel le souci d'adaptabilité est fondamental. L'ensemble des solutions retenues se veut flexible et surtout *modulable* : les plaques de PP cannelées, peuvent être facilement découpées ; les attelles métalliques assemblées entre elles et les bandes de Vetcast<sup>TM</sup>Plus

formées en coques rigides selon la forme d'un artefact particulier, ou d'un lot d'artefacts. Si ces choix me paraissent amplement justifiés, ils demandent toutefois un certain investissement en temps pour leur mise en oeuvre, dont il faudra tenir compte plusieurs dizaines de minutes avant le départ du site.

Le caisson isotherme réalisé répond lui aussi à des contraintes restrictives bien plus qu'à des choix véritables. Il semble toutefois constituer une solution de stockage appropriée (du moins largement supérieure à celle d'un transport dans un simple sac à dos avec les risques que comporte ce dernier). La capacité du caisson à maintenir de basses températures est avant tout dépendante de l'utilisation qu'il en sera faite. On pourra s'interroger à juste titre sur la raison de chercher à fabriquer ce qui est, fondamentalement, une glacière... Même si les matériaux de construction ne peuvent pas être qualifiés d'onéreux, le temps nécessaire à la réalisation est quant à lui tout à fait "déraisonnable". S'agissant là d'un *prototype* réalisé dans un but spécifique et dans le cadre d'un travail de diplôme, je considère que cette partie du projet conserve sa pertinence : les principaux avantages sont ici la combinaison avec les *Lastenkraxe* et l'alternative d'un deuxième couvercle incluant un système d'apport de froid pour le trajet en voiture. Le système de *cushioning* constitué d'étages amovibles et de *pillows* me paraît optimal en termes de protection (ce qui va malheureusement de pair avec une perte conséquente en volume de stockage utilisable).

On pourra regretter qu'aucune solution de stockage tempéré ne soit apportée aux artefacts dont les dimensions sont supérieures à celles du caisson. Ces artefacts ne sont en aucun cas moins susceptibles de développer des micro-organismes et peuvent parfois se révéler plus sensibles aux variations d'hygrométrie. C'est là un aspect qu'il m'aurait plu d'approfondir, mais qui, faute de temps, n'a jamais dépassé le stade d'esquisse. Dans l'idéal, ce "*soft module*" devrait avoir une taille adaptable (ce qui pourrait s'obtenir en enroulant sur lui-même le "surplus dimensionnel", à la manière des sacs étanches de certains sports aquatiques) et pouvoir être rigidifié (au moyen de tiges de fibres de carbone?). Je suis convaincu qu'un multi-couches trouverait ici son application. Il serait également intéressant de regarder du côté des sacs à vacuum tels que ceux utilisés par la REGA (*Schweizerische Rettungsflugwacht*).

Le choix des *Lastenkraxe*<sup>229</sup> s'est révélé être, pour l'avoir testé en montagne pendant plusieurs heures et avec une charge d'une vingtaine de kilos, une option toute désignée pour ce genre de projet.

Je tiens finalement à revenir ici sur la contrainte temporelle associée à ce projet, qui visait à un certain degré d'aboutissement dès les mois d'automne 2007, au moment où auraient pu avoir lieu les premières expéditions sur le site, soit quelques mois à peine après le début de mon stage. Ce ne fut finalement pas le cas, mais cet aspect a fortement influencé le déroulement de mon travail : certains choix ou options retenues n'ont pas pu être suffisamment pesées, mes recherches ont ensuite suivi de nouvelles voies, et le temps nécessaire pour explorer et tester d'autres alternatives n'a pas toujours été disponible.

---

<sup>229</sup>En tout trois Tatonka® Lastenkraxe et trois sac Tatonka® Barrel "S" ont été commandé pour ce projet, de manière à transporter le matériel décrit dans ce travail tout comme les techniques de dégagement développées par Charlotte Rerolles. Ces dernières comprennent plusieurs outils de travail de la glace, dont un *airbrush* qui implique également d'acheminer un compresseur et un groupe électrogène sur le site.

## Conclusion

En guise de conclusion, je tiens à souligner ici que les aspects décrits dans ce travail ne constituent qu'une infime partie du processus global qui entoure le mobilier archéologique issu de la glace. Y succèdent, dans un ordre non absolu et menées par différents intervenants, les opérations de : stockage provisoire au laboratoire ; constat d'état et identification / documentation / examen préliminaires ; prélèvement d'échantillons ; étude / analyses ; conservation et, au besoin, restauration ; conditionnement / stockage à long terme ou exposition.

Du point de vue de la seule conservation, le principe d'intervention minimale doit évidemment être, dans la mesure du possible, l'idéal recherché. Dans cette idée, les mesures d'emballage et de stockage / conditionnement provisoires constituent une première intervention indirecte qui contribue à limiter le besoin ultérieur de traitement. Il paraît ici essentiel de chercher à caractériser plus précisément le degré de préservation / dégradation (et l'état hydrique) de tels matériaux, de manière à éviter la mise en oeuvre de traitements superflus, qui risquent de prêter à des analyses ultérieures. La recherche interdisciplinaire et la collaboration sous forme d'échange des observations réalisées en est une phase essentielle.

Faute d'avoir pu tester personnellement en conditions réelles (et non simulées) l'équipement préparé, je suis impatient d'écouter les commentaires des professionnels qui utiliseront ce matériel. Je crains également les commentaires des sherpas.

Ne reste donc plus qu'à attendre la poursuite de la fonte de la portion restante du banc de glace du Schnidejoch... ou la découverte d'un nouveau site d'altitude. C'est sur ce dernier aspect que je souhaite conclure ce document, car l'enjeu majeur est bien la découverte de tels sites qui semble ne tenir qu'à un exceptionnel et rarissime concours de circonstances : le premier point en est (i) une situation topographique favorable (*permanence* d'une couverture de glace *immobile*), sur (ii) un passage autrefois fréquenté où (iii) des artefacts ont été *perdus* ou *abandonnés*. La probabilité de réunir ces trois conditions paraît d'emblée relativement mince. A cela s'ajoute encore l'aspect hautement hasardeux de la découverte, qui doit intervenir suffisamment tôt afin que les matériaux les plus sensibles ne soient pas perdus.

A ce jour, les découvertes ont toutes été réalisées de manière fortuite. Espérons que les randonneurs et alpinistes garderont l'oeil ouvert et qu'ils adoptent le cas échéant la seule attitude adéquate : contacter immédiatement les autorités compétentes. Dans cette perspective, l'information du grand public constitue un facteur déterminant, car le groupe de randonneurs déjà rencontrés à quelques reprises dans ce texte, pourrait bien n'être en rien sensibilisé à l'archéologie en montagne et décider de griller ici les cervelas de son pique-nique avec les bois sortis d'un long sommeil millénaire dans la glace.

## Bibliographie

- Åkerlund, M. (ed.). *Proceedings of the 3rd Nordic Symposium on Insect Pest Control in Museums September 24-25, 1998*. PRE-MAL/ICOM Swedish National Committee, Stockholm, 1998.
- Allsopp, Dennis *et al.* *Introduction to Biodeterioration*. 2<sup>nd</sup> Edition. Cambridge University Press, 2004.
- Arriaza, Bernardo et Pfister, Luz-Andrea. Working with the Dead. In Cassman, V. *et al.* *Human Remains – Guide for Museums and Academic Institutions*. AltaMira Press, Oxford, 2007, p.205–221.
- Bagolini, Bernardo *et al.* Der Mann im Eis : Die Fundbergung 1992 am Tisenjoch, Gem. Schnals, Südtirol. In Spindler, K. *et al.* (eds.). *Der Mann im Eis – Neue Funde und Ergebnisse*. Springer, Wien, 1995, p.3–52. The Man in the Ice – vol. 2.
- Baker, Mary T. Synthetic Polymers. In Rose, C.L. *et al.* *Storage of Natural History Collections : A Preventive Conservation Approach – Volume I*. Society for the Preservation of Natural History Collections, Iowa City, 1995, p.305–322.
- Bellwald, Werner. Drei spätneolithischen/frühbronzezeitliche Pfeilbogen aus dem Gletschereis am Lötschenpass. *as. archéologie suisse*, 1992, 15, 4, p.166–171.
- Berducou, Marie-Claude. Introduction à la conservation archéologique. In Berducou, M.-C. (Coord.). *La conservation en archéologie*. Masson, Paris, 1990, p.3–35.
- Bianchi, Ana-Maria *et al.* *Transferts Thermiques*. Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2004.
- Blanchette, Robert A. A review of microbial deterioration found in archaeological wood from different environments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2000, 46, p.189–204.
- Bortenschlager, Sigmar *et al.* Erste Ergebnisse der Auswertung der vegetabilischen Reste vom Hauslabjochfund. In Höpfel, F. *et al.* (eds.). *Der Mann im Eis – Band 1 : Bericht über das Internationale Symposium 1992 in Innsbruck*. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck 187, Innsbruck, 1992, p.307–312.
- Bouchet, Françoise *et al.* Parasite Remains in Archaeological Sites. *Memorias do Instituto do Oswaldo Cruz*, 2003, 98, p.47–52.
- Bratasz, Lukasz *et al.* Allowable thresholds in dynamic changes of microclimate for wooden cultural objects : monitoring in situ and modelling. In *Preprints of the 14th Triennial Meeting of the ICOM, The Hague, 12-16 september 2005 – Volume II*. International Council of Museums (ICOM), London, 2005, p.582–589.
- Brochier, J.-E. Les phytolithaires. In Ferdière, A. (Dir.). *La botanique*. Edition Errance, Paris, 1999, p.157–170. Collection “Archéologiques”.
- Brooks, Mary *et al.* Artifact or Information? Articulating the Conflicts in Conserving Archaeological Textiles. In Ashok, R. et Smith, P. (eds.). *Archaeological Conservation and Its Consequences – Preprints of the Contributions to the Copenhagen Congress, 26-30 August 1996*. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London, 1996, p.16–21.

- Brown, Giles H. Glacier meltwater hydrochemistry. *Applied Geochemistry*, 2002, 17, p.855–883.
- Burger, Joachim *et al.* DNA preservation : A microsatellite-DNA study on ancient skeletal remains. *Electrophoresis*, 1999, 20, p.1722–1728.
- Cahagnier, Bernard. Rôle de l'humidité sur le développement des microorganismes. In Roquebert, M.-F.. *Les contaminants biologiques des biens culturels*. Masson, Paris, 2002, p.89–100.
- Cameron, Esther *et al.* The conservation of archaeological leather. In Kite, M. et Thomson, R. (eds). *Conservation of Leather and Related Materials*. Gutter worth-Heinemann. Elsevier, Oxford, 2006, p.244–263.
- Capasso, Luigi *et al.* Notes on the Paleopathology of the Mummy from Hauslabjoch/Val Senales (Southern Tyrol, Italy). In Höpfel, F. *et al.* (eds.). *Der Mann im Eis – Band 1 : Bericht über das Internationale Symposium 1992 in Innsbruck*. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck 187, Innsbruck, 1992, p.209–213.
- Carrlee, Ellen. Does low-temperature pest management cause damage ? Literature review and observational study of ethnographic artefacts. *JAI*, 2003, 42, 2, p.141–166.
- Cassman, Vicki et Odegaard, Nancy. Treatment and Invasive Actions. In Cassman, V. *et al.* *Human Remains – Guide for Museums and Academic Institutions*. AltaMira Press, Oxford, 2007a, p.77–95.
- Cassman, Vicki et Odegaard, Nancy. Storage and Transport. In Cassman, V. *et al.* *Human Remains – Guide for Museums and Academic Institutions*. AltaMira Press, Oxford, 2007b, p.103–128.
- Chabal, Lucie *et al.* L'anthracologie. In Ferdière, A. (Dir.). *La botanique*. Edition Errance, Paris, 1999, p.43–104. Collection “Archéologiques”.
- Child, A. M. Microbial Taphonomy of Archaeological Bone. *Studies in Conservation*, 1995, 40, 1, p.19–30.
- Chiotasso, Laura M. et Sarnelli, Costantino. Preservation and conservation of archaeological objects in leather and vegetal fibres. In Ashok, R. et Smith, P. (eds.). *Archaeological Conservation and Its Consequences – Preprints of the Contributions to the Copenhagen Congress, 26-30 August 1996*. International Institute for Conservation of Historic an Artistic Works, London, 1996, p.27–31.
- Cronyn, Janey M. *The Elements of Archaeological Conservation*. Routledge, London, 1990.
- Cruzbézi, Eric *et al.* *Anthropobiologie*. Masson, Paris, 2002.
- Deutsches Archäologisches Institut (DAI). *Mongolei : Berg-Altaj (Bajan Ul'gijskij Ajmak) – Forschungen zu skythenzeitlichen Eiskurganen in den Hochgebirgstälern des mongolischen Altaj*. [En ligne – Actualisiert : 20/03/08]. Site du Deutsches Archäologisches Institut. 2008, [Page consultée le 15 avril 2008]. Disponibilité et accès : [http://www.dainst.org/index\\_3933\\_fr.html#](http://www.dainst.org/index_3933_fr.html#).
- Centre de Conservation du Québec (CCQ). Tyvek®. [En ligne]. Préserv'Art – Site du Centre de Conservation du Québec (CCQ). [Page consultée le 28 novembre 2007]. Disponibilité et accès : <http://preservart.ccq.mcc.gouv.qc.ca/rptFicheProduit.aspx?NoProduit=P0096>.



- de La Baume, Sylvia. Les matériaux organiques (Chap. VI). In Berducou, M.-C. (Coord.). *La conservation en archéologie*. Masson, Paris, 1990, p.222–270.
- Dillehay, Tom D. Reflection on Material Culture and Identity. In Drooker, P.B. (ed.). *Fleeting Identities – Perishable Material Culture in Archaeological Research*. Center for Archaeological Investigation ; Southern Illinois University, Carbondale, 2001, p.16–24. Occasional Paper No. 28.
- Dove, Carla J. et al. Identification of Ancient Feather Fragments Found in Melting Alpine Ice Patches in Southern Yukon. *Arctic*, 2005, 58, 1, p.38–43.
- Drooker, Penelope B. Material Culture and Perishability. In Drooker, P.B. (ed.). *Fleeting Identities – Perishable Material Culture in Archaeological Research*. Center for Archaeological Investigation ; Southern Illinois University, Carbondale, 2001, p.3–15. Occasional Paper No. 28.
- Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA). Assemblage bois et dérivés conception système – Matériaux d'isolation. CTBA. 2007.
- Egarter-Vigl, Eduart. The Preservation of the Iceman Mummy. In Samadelli, M. (ed.). *In Search of Immortality – The Chalcolithic Mummy – Volume 3*. Museo Archeologico Dell'Alto Adige, 2006, p.45–70. Collana del Museo Archeologico dell'Alto Adige.
- Egg, Markus. Die Ausrüstung des Toten. In Egg, K.. *Die Gletschermumie vom Ende der Steinzeit aus den Ötztaler Alpen – Vorbericht*. Sonderdruck aus Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums 39, Mainz, 1992, p.35–100.
- European Confederation of Conservator-Restorers' Organisations (E.C.C.O.). *Professional Guidelines (III) : Basic Requirements for Education in Conservation-Restoration*. Promoted by the European Confederation of Conservator-Restorers' Organisations and adopted by its General Assembly Brussels 1 March 2002. Updated at the General Assembly 7 March 2003.
- Evershed, Richard P. Biomolecular Analysis by Organic Mass Spectrometry. In Ciliberto, G. (eds.). *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*. John Wiley & Sons, Inc. Publication, New York, 2000, p.177–239. Chemical Analysis – Volume 155.
- Farnell, Richard et al. Multidisciplinary Investigations of Alpine Ice Patches in Southwest Yukon, Canada : Paleoenvironmental and Paleobiological Investigations. *Arctic*, 2004, 57, 3, p.247–259.
- Fell, Vanessa. Washing away the evidence. In Ashok, R. et Smith, P. (eds.). *Archaeological Conservation and Its Consequences – Preprints of the Contributions to the Copenhagen Congress, 26-30 August 1996*. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London, 1996, p.48–51.
- Finstad, Espen. ARCCLIM – Archaeologie and Climate. [En ligne – Actualized 02/10/07] Site de la municipalité de l'Oppland (Norvège). 2007, [Page consultée le 18 avril 2008]. Disponibilité et accès : <http://www.opplandstrafikk.no>.

- Florian, Mary-Lou. *Heritage Eaters – Insects & Fungi in Heritage Collections*. James & James, London, 1997.
- Florian, Mary-Lou E. Deterioration of organic materials other than wood. In Pearson, C.. *Conservation of Marine Archaeological Objects*. Butterworth, London, 1987, p.21–54. Butterworths series in conservation and museology.
- Florian, Mary-Lou E. The Mechanisms of Deterioration in Leather. In Kite, M. et Thomson, R. (eds). *Conservation of Leather and Related Materials*. Gutter worth-Heinemann. Elsevier, Oxford, 2006, p.36–57.
- Florian, Mary-Lou E. et al. *The Conservation of Artifacts Made from Plant Materials*. Getty Conservation Institute, Princeton, 1990.
- Fratzl, Peter. Cellulose and collagen : from fibres to tissues. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2003, 8, 1, p.32–39.
- Gheyle, Wouter et al. Saviours from space for Siberia's frozen tombs. *A World of Science*, 2006, 4, 3, p.19–23.
- Giancoli, Douglas C. *Physique générale – Mécanique et thermodynamique*. 3<sup>e</sup> tirage. De Boeck Université, Bruxelles, 2002. Volume 1.
- Gilichinsky, D. A. Permafrost Microbiology. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1995, 6, 4, p.281–291.
- Giligny, François. De la fouille à l'interprétation : le traitement des données. In Demoule, J-P. et al. *Guide des méthodes de l'archéologie*. La Découverte, Paris, 2002, p.127–184. Guides Repères.
- Giligny, François et Lehöerff, Anne. Les cadres de l'interprétation. In Demoule, J-P. et al. *Guide des méthodes de l'archéologie*. La Découverte, Paris, 2002, p.83–126. Guides Repères.
- Dry & Safe GmbH. *SAP - Vliesmatten et Superabsorber - Das Netzwerk für Ihren Erfolg*. [En ligne]. Site commercial de Dry & Safe GmbH. 2007, [Page consultée le 16 novembre 2007]. Disponibilité et accès : <http://www.silicagel.ch/silicagel/index.html?lang=de&target=d181.html>.
- Gobat, Jean-Michel et al. *Le sol vivant – bases de pédologie, biologie des sols*. 2<sup>e</sup> éd. revue et augm. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2003.
- Goffer, Zwi. *Archaeological Chemistry*. 2<sup>nd</sup> Edition. Wiley-Interscience, New Jersey, 2007.
- Grant, Tara. Field Conservation in the Eastern Arctic. *ICC Newsletter*, 1993, 12, p.5–7.
- Grattan, David W. Waterlogged wood. In Pearson, C.. *Conservation of Marine Archaeological Objects*. Butterworth, London, 1987, p.55–67. Butterworths series in conservation and museology.
- Green, L. R. et Thickett, D. Testing materials for use in the storage and display of antiquities - A revised methodology. *Studies in Conservation*, 1995, 40, 3, p.145–152.
- Grosjean, Martin et al. Ice-borne prehistoric finds in the Swiss Alps reflect Holocene glacier fluctuations. *Journal of Quaternary Science*, 2007, 22, 3, p.203–209.

- Guild, Sherry et MacDonald, Maureen. *Prévention des moisissures et récupération des collections : Lignes directrices visant les collections du patrimoine*. Institut Canadien de Conservation, Ottawa, 2004. Bulletin technique 26.
- Guillemard, Denis. *Les matériaux de la conservation*. 2003. Université de Paris I - Panthéon-Sorbonne, Section de conservation-restauration, support de cours, *non publié*.
- Haines, B. M. The fibre structure of leather. In Kite, M. et Thomson, R. (eds). *Conservation of Leather and Related Materials*. Gutter worth-Heinemann. Elsevier, Oxford, 2006a, p.11–21.
- Haines, B. M. Collagen : the leathermaking protein. In Kite, M. et Thomson, R. (eds). *Conservation of Leather and Related Materials*. Gutter worth-Heinemann. Elsevier, Oxford, 2006b, p.4–10.
- Hansen, Jens P. H. *et al.* *The Greenland Mummies*. Smithsonian Institution Press, Washington, 1991.
- Hare, P. Gregory *et al.* Ethnographic and Archaeological Investigations of Alpine Ice Patches in Southwest Yukon, Canada. *Arctic*, 2004, 57, 3, p.260–272.
- Hart, Harold et Conia, Jean-Marie. *Introduction à la chimie organique*. Dunod, Paris, 2002.
- Hatchfield, Pamela B. *Pollutants in the museum environment : practical strategies for problem solving in design exhibition and storage*. Archetype Publications Ltd, London, 2002.
- Hedges, Robert E. M. Radiocarbon Dating. In Ciliberto, G. (eds.). *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*. John Wiley & Sons, Inc. Publication, New York, 2000, p.465–502. Chemical Analysis – Volume 155.
- Held, B.W. *et al.* Environmental factors influencing microbial growth inside the historic expedition huts of Ross Island, Antarctica. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, 55, 1, p.45–53.
- Hess, M.W. *et al.* Histological Investigations on the Tyrolean Ice Man. *American Journal of Physical Anthropology*, 1998, 106, p.521–532.
- Hett, Charles E. S. Conservation measures on Arctic sites. In Hodges, Henry W. M. (ed.). *In situ archaeological conservation : proceedings of meetings 6-13 April 1986*. Instituto Nacional de Antropologia e Historia ; J. Paul Getty Trust, Mexico, 1987, p.64–69.
- Horne, P. D. The Prince of El Plomo : a frozen treasure. In Spindler, K. *et al.* (eds.). *Human Mummies : a Global Survey of their Status and the Techniques of Conservation*. Springer, Wien, 1996, p.153–157. The Man in the Ice – vol. 3.
- Hurault, Etienne. Permafrost : son dégel menace-t-il la planète ? *Science & vie*, 2005, 1058, p.86–91.
- Jacomet, Stefanie et Schibler, Jörg. *Archäobiologische Untersuchungen : Wie komme ich zum Material ?* Merkblatt aus : Archäologie der Schweiz Vol.22(1), 1999, ergänzt [En ligne]. Site de l'Université de Bâle, 1999. [Page consultée le 24 janvier 2008]. Disponibilité et accès : [http://pages.unibas.ch/arch/archbiol/Archaeobiol\\_Probenent.pdf](http://pages.unibas.ch/arch/archbiol/Archaeobiol_Probenent.pdf).

- Jacot, Thierry et Pedregal, Pierre Diaz. *Cours 6 : Calcul du rapport de mélange*. 2007. Bachelor of Arts HES-SO en Conservation – Module AW1 – Support de cours. *non publié*.
- Jochim, Roy S. Analysing Plant Remains (Chap. 11). In Banning, E.B.. *The Archaeologist's Laboratory : The Analysis of Archaeological Data*. Springer, 2000, p.213–233.
- Jockey, Philippe. *L'archéologie*. Editions Bélin, Paris, 1999.
- Kaufmann, Bruno. The corpse from the Porchabella-glacier in the Grisons, Switzerland : (community of Bergün). In Spindler, K. et al. (eds.). *Human Mummies : a Global Survey of their Status and the Techniques of Conservation*. Springer, Wien, 1996, p.239–246. The Man in the Ice – vol. 3.
- Kronkright, Dale Paul. Deterioration of Artifacts Made From Plant Materials. In Florian, Mary-Lou et al. (eds). *The Conservation of Artifacts Made From Plant Materials*. Getty Conservation Institute, Princeton, 1990, p.139–193.
- Lippert, Andreas. Die erste archäologische Nachuntersuchung am Tisenjoch. In Höpfel, F. et al. (eds.). *Der Mann im Eis – Band 1 : Bericht über das Internationale Symposium 1992 in Innsbruck*. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck 187, Innsbruck, 1992, p.245–253.
- Logan, Judith A. et al. Retrieving and Conserving Organic Material from Archaeological Contexts. In Drooker, P.B. (ed.). *Fleeting Identities – Perishable Material Culture in Archaeological Research*. Center for Archaeological Investigation ; Southern Illinois University, Carbondale, 2001, p.137–151. Occasional Paper No. 28.
- Kenneth S. Marsh & Associated Ltd. *Export Packaging Bulletin No. 2 – How to Reduce Food Degradation with Appropriate Processing, Transportation and Packaging*. International Trade Centre UNCTAD/WTO, USA, 2002.
- Ludes, B. et Crubézy, E. Applications des techniques de la biologie moléculaire à la criminalistique et à la paléanthropologie. *Revue française des laboratoires*, 1998, 299, p.39–45.
- Meyer, Werner. Der Söldner vom Theodulpaß und andere Gletscherfunde aus der Schweiz. In Höpfel, F. et al. (eds.). *Der Mann im Eis – Band 1 : Bericht über das Internationale Symposium 1992 in Innsbruck*. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck 187, Innsbruck, 1992, p.321–333.
- Michalski, Stefan. Freezing wood and parchment. *Paper Conservation News*, 1996, 809, p.11–12.
- Mills, John S. et White, Raymond. *The Organic Chemistry of Museum Objects*. Second edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1994. Chap. VII – Proteins, p.84-94.
- Miram, Wolfgang et Sharf, Karl-Heinz. *Biologie – des molécules aux écosystèmes*. 3<sup>e</sup> édition. LEP, Loisirs et Pédagogie, Lausanne, 1998.
- Méric, Laure. L'eau dans les livres. In *La climatologie dans les archives et les bibliothèques – Actes des Troisièmes Journées sur la Conservation Préventive, Arles, 2-3 décembre 1998*. Centre de Conservation du Livre, Arles, 2000, p.25–38.

- Nilson, Thomas. Microbial Degradation of Wood – An Overview with Special Emphasis on Waterlogged Wood. In Bonnot-Diconne, Celine *et al.* (eds). *Proceedings of the 7<sup>th</sup> ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Grenoble, 1998*. ICOM-CC, WOAM, Grenoble, 1999, p.65–70.
- Obleitner, Friedrich et Lehning, Michael. Measurement and simulation of snow and superimposed ice at the Kong-svegen glacier, Svalbard (Spitzbergen). *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, p.1–31.
- O'Connor, T.P. On the Structure, Chemistry and Decay of Bone, Antler and Ivory. In Starling, K. et Watkinson, D. (Eds). *Archaeological Bone, Antler and Ivory – Proceedings of a conference held by UKIC Archaeology Section, December 1984*. The United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works of Art, 1987, p.6–8. Occasional Papers Number 5.
- Oeggli, K. et Schoch, W. Analysis of the bast used by the Iceman as bindings material. In Bortenschlager, S. et Oeggli, K. (eds.). *The Iceman and his Natural Environment – Palaeobotanical results*. Springer, Wien, 2000, p.29–61. The Man in the Ice – vol. 4.
- Oeggli, K. *et al.* Epilogue : The search for explanations and future developments. In Bortenschlager, S. et Oeggli, K. (eds.). *The Iceman and his Natural Environment – Palaeobotanical results*. Springer, Wien, 2000, p.163–166. The Man in the Ice – vol. 4.
- on Climate Change (IPPC), Intergovernmental Panel. *Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.). IPPC, Geneva, 2007.
- Owen, Rita et Doyle, Adrian. A preliminary investigation into using Tyvek® bags for short-term storage as a means of protectin herbaria from damage by insect pests such as *Stefobium paniceum*. *NatSCA News*, 2007, 11, p.10–16.
- Pache, Charles. “Fortec” – *Formulaire Technique*. 9<sup>e</sup> Edition. Editec, Oulens, 1996.
- Peacock, Elizabeth E. A note on the effect of multiple freeze-thaw treatment on natural fibre fabrics. *Studies in Conservation*, 1999, 44, 1, p.12–18.
- Peacock, Elizabeth E. Conservation of Severely Deteriorated Wet Archaeological Leather Recovered From the Norwegian Arctic. Preliminary Results. In Hoffmann, P. *et al.* (eds). *Proceedings of the 9th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference. Copenhagen, 7-11 June 2004*. ICOM-CC, WOAM, Bremerhaven, 2005, p.565–578.
- Permafrost Monitoring Switzerland (PERMOS), J. *et al.* Le permafrost dans les Alpes suisses en 2004/2005 et 2005/2006. *Les Alpes*, 2007, 83, 9, p.26-33.
- Peters, Ann H. *et al.* Associated Artifacts. In Cassman, V. *et al.* *Human Remains – Guide for Museums and Academic Institutions*. AltaMira Press, Oxford, 2007, p.129–150.
- Pfeifer, K. et Oeggli, K. Analysis of the bast used by the Iceman as bindings material. In Bortenschlager, S. et Oeggli, K. (eds.). *The Iceman and his Natural Environment – Palaeobotanical results*. Springer, Wien, 2000, p.69–76. The Man in the Ice – vol. 4.

- Pitulko, Vladimir V. Methods of Excavating Stone Age Sites Associated with Permafrost. *Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 2007, 31, 3, p.29–38.
- Plumet, Patrick. *Tuvaaluk – Glossaire Archéologique*. In *Site de l'Université du Québec à Montréal*. [En ligne]. 2002, [Page consultée le 16 avril 2008]. Disponibilité et accès : <http://www.unites.uqam.ca/tuvaaluk/accueil/glossaire.html>.
- Regert, Martine et Rolando, Christian. Archéologie des résidus organiques - De la chimie analytique à l'archéologie : un état de la question. Number 3. 1996, p.118–128.
- Regert, Martine *et al.* Structural characterization of lipid constituents from natural substances preserved in archaeological environments. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14, p.1620–1630.
- Resource, British Archaeological Job. *Glossary of common archaeological terms*. [En ligne – compiled : 28/04/2004]. Site du British Archaeological Job Resource. 2004, [Page consultée le 15 avril 2008]. Disponibilité et accès : <http://www.bajr.org/documents/glossaryofterms.pdf>.
- Richard, Hervé. La palynologie. In Ferdière, A. (Dir.). *La botanique*. Edition Errance, Paris, 1999, p.9–42. Collection “Archéologiques”.
- Richards, Maechel Philip. Archaeometry and Antique Analysis : (d) Organic and Biological Materials. In Worsfold, P. *et al.* *Encyclopedia of Analytical Science*. Elsevier, Oxford, 2005, p.127–132.
- Roberts, Heidi et Eklund, Julie. Fieldwork. In Cassman, V. *et al.* *Human Remains – Guide for Museums and Academic Institutions*. AltaMira Press, Oxford, 2007, p.183–203.
- Rolle, Renate. Die skythenzeitlichen Mumienfunde von Pazyryk – Frostkonservierte Gräber aus dem Altaigebirge. In Höpfel, F. *et al.* (eds.). *Der Mann im Eis – Band 1 : Bericht über das Internationale Symposium 1992 in Innsbruck*. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck 187, Innsbruck, 1992, p.334–358.
- Roy, Diana M. *et al.* Using Stable Isotope Analysis to Obtain Dietary Profiles From Old Hair : A Case Study From Plains Indians. *American Journal of Physical Anthropology*, 2005, 128, p.444–452.
- Schedl, W. Contribution to insect remains from the accompanying equipment of the Iceman. In Bortenschlager, S. et Oeggel, K. (eds.). *The Iceman and his Natural Environment – Palaeobotanical results*. Springer, Wien, 2000, p.151–155. The Man in the Ice – vol. 4.
- Schoch, W. *et al.* *Wood anatomy of central European Species*. [En ligne], 2004. [Page consultée le 23 mai 2008]. Disponibilité et accès : [www.woodanatomy.ch](http://www.woodanatomy.ch).
- Scott, Rosalie et Grant, Tara. *Conservation Manual for Northern Archaeologists*. Revised 3<sup>rd</sup> Edition. Prince of Wales Northern Heritage Center. ICC., Canada, 2006.
- Siever, Frank Press & Raymond. *Understanding Earth*. 3<sup>rd</sup> Edition. W.H. Freeman and Company, New York, 2002.
- Spangenberg, Jorge E. *et al.* Chemical Analyses of organic residues in archaeological pottery from Arbon Bleiche 3, Switzerland – evidence for dairying in the late Neolithic. *Journal of Archaeological Science*, 2006, 33, p.1–13.

- Spindler, Konrad. Iceman's last weeks. In Spindler, K. et al. (eds.). *Human Mummies – a Global Survey of their Status and the Techniques of Conservation*. Springer, Wien, 1996, p.249–263. The Man in the Ice – vol. 3.
- Strzelczyk, A.B. et al. Biodeterioration of Archeological Leather. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1997, 39, 4, p.301–309.
- Åstveit, Leif Inge. Høyfjellsarkeologi under snø og is – Global oppvarming, fonnjakt og funn fra snøfonner datert til steinalder. *Viking – Norwegian Archaeological Society*, 2007, p.7–22.
- Suter, Peter J. et al. Lenk- Schnidejoch. *Funde aus dem Eis – ein vor- und frühgeschichtlicher Passübergang*. Sonderdruck aus Archäologie im Kanton Bern, Band 6B, Bern, 2005a. p.499-522.
- Suter, Peter J. et al. Prähistorische und Frühgeschichtliche Funde aus dem Eis – der wiederentdeckte Pass über das Schnidejoch. *Archäologie der Schweiz*, 2005b, 28, 4, p.16–23.
- Taylor, R.E. The Contribution of Radiocarbon Dating to New World Archaeology. *Radiocarbon*, 2000, 42, 1, p.1–21.
- Tougaard, Christelle. ADN et mammoths. *Dossiers d'Archéologie*, 2004, 291, p.28–31.
- Unger, Achim et al. *Conservation of Wood Artifacts – A Handbook*. Springer, Berlin, 2001.
- van Waateringe, W. Groenman et al. The curing of hides and skins in European prehistory. *Antiquity*, 1999, 73, 279, p.884–890.
- van Waateringe, Willy Groenman. Pollenanalyse als Indikator für das Gerbeverfahren bei den Tierfellen des Mannes vom Tisenjoch. In Spindler, K. et al. (eds.). *Der Mann im Eis – Neue Funde und Ergebnisse*. Springer, Wien, 1995, p.67–70. The Man in the Ice – vol. 2.
- van Waateringe, Willy Groenman et Goedecker-Ciolek, Roswitha. The Equipment made of hide and leather. In Höpfel, F. et al. (eds.). *Der Mann im Eis – Band 1 : Bericht über das Internationale Symposium 1992 in Innsbruck*. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck 187, Innsbruck, 1992, p.410–417.
- VanderHoek, Richard et al. Cultural Materials Recovered from Ice Patches in the Denali Highway Region, Central Alaska, 2003-2005 – Report. *Alaska Journal of Anthropology*, 2007a, 5, 2, p.185–200.
- VanderHoek, Richard et al. Survey and Monitoring of Ice Patches in the Denaly Highway Region, Central Alaska, 2003-2005. *Alaska Journal of Anthropology*, 2007b, 5, 2, p.67–86.
- Vasquez, Jorge. Technique de fouille et de prélèvement d'une tombe dite "gelée" au Kazakhstan. In *Les objets archéologiques : de la fouille au musée – XV<sup>èmes</sup> Journées des restaurateurs en archéologie organisées par le laboratoire de conservation-restauration du Musée archéologique du Val-d'Oise, 23 et 24 septembre 1999*. ARAAFU, Paris, 1999, p.13–15. Conservation-restauration des biens culturels – Cahier technique n° 13.
- Volken, Marquita. *Le cuir archéologique romain*. Mémoire de Licence en archéologie gallo-romaine à l'université de Lausanne, 2005. non publié.

- Vuissoz, Annick *et al.* The survival of PCR-amplifiable DNA in cow leather. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34, p.823–829.
- Weintraub, Steven et Wolf, Sara J. Macro- and Microenvironments. In Rose, Carolyn L. *et al.* *Storage of Natural History Collections : A Preventive Conservation Approach – Volume I*. Society for the Preservation of Natural History Collections, Iowa City, 1995, p.123–134.
- Williams, Stephen L. *Destructive Preservation – A Review of the Effect of Standard Preservation Practices on the Future Use of Natural History Collections*. Acta Universitatis Gothoburgensis, Göteborg, 1999.
- Williams, Stephen L. et Hawks, Catharine A. Condition of Type Specimens of the Genus *Peromyscus*. *Journal of Mammalogy*, 1992, 73, 4, p.731–743.
- Williams, Stephen L. *et al.* Effect of “Freezing” Treatments on the Hydrothermal Stability of Collagen. *JAIC*, 1995, 34, p.107–112.
- Wilson, Andrew S. *et al.* Survival of Human Hair - The Impact of the Burial Environment. In Williams, E. (ed.). *Human Remains – Conservation, retrieval and analysis. Proceedings of a conference held in Williamsburg, VA, Nov 7-11<sup>th</sup> 1999*. Archaeopress, Oxford, 2001, p.119–127. BAR International Series 934.
- Yang, Dongya Y. et Watt, Kathy. Contamination controls when preparing archaeological remains for ancient DNA analysis. *Journal of Archaeological Science*, 2005, 32, p.331–336.
- Zhang, Yi-Heng Percival et Lynd, Lee R. Toward an Aggregated Understanding of Enzymatic Hydrolysis of Cellulose : Noncomplexed Cellulase Systems. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, 88, 7, p.797–824.
- Zimmerman, Micheal R. et Smith, George S. A Probable Case of Accidental Inhumation of 1'600 Years Ago. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 1975, 51, 7, p.828–837.
- Zuppiroli, Libero et Bussac, Marie-Noëlle. *Traité des couleurs*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001.
- zur Nedden, Dieter *et al.* New Findings on the Tyrolean “Ice Man” : Archaeological and CT-Body Analysis Suggest Personal Disaster Before Death. *Journal of Archaeological Science*, 1994, 21, p.809–818.



## Table des figures

1	Partie d'un carquois néolithique (2003) ; Photographie : ADB – laboratoire de conservation©.	13
2	Situation géographique du site Lenk-Schnidejoch, itinéraires préhistoriques et d'époque romaine et étendue des glaciers ; Sources : Suter <i>et al.</i> , 2005a, p.520-521 et carte Dufour 1864.	14
3	Lenk-Schnidejoch 2004 – Vue du col ; Photographie : ADB©.	15
4	Lenk-Schnidejoch 2007 – Vue du site ; Photographie : ADB©.	15
5	Fragment de textile romain (2004) ; Photographie : ADB – laboratoire de conservation©.	16
6	Anneaux de branches entrelacées ; Source : Suter <i>et al.</i> , 2005a, p.507.	16
7	Fragment de cuir d'une chaussure néolithique (2004) ; Source : Suter <i>et al.</i> , 2005a, p.512.	17
8	Dégagement du carquois d'Ötzi (1991) ; Source : Egg 1992, p.39.	22
9	Partie centrale du carquois néolithique ; Lenk-Schnidejoch (2005) ; Source : Suter <i>et al.</i> , 2005a, p.509.	22
10	Découverte d'un artefact sur un <i>ice patch</i> norvégien ; Source : Farbrege, O., 1972, Annexe 17.	31
11	Col de l'Hauslabjoch 1991 – Excavation de la faille rocheuse ; Source : Lippert, A., 1992, p.249.	33
12	Col de l'Hauslabjoch 1992 – Vue du site ; Source : Bagolini, B. <i>et al.</i> , 1995, p.48.	33
13	Structure primaire de la cellulose ; Source : Zhang et Lynd, 2004, p.799.	35
14	Polycondensation des acides aminés ; Source : Haines, B.M., 2006, p.5.	35
15	Fibrilles et fibres de collagène ; Source : Haines, M.B., 2006, p.11.	36
16	Courbe isotherme de sorption ; D'après Méric, L., 2000, p.26.	38
17	Schéma synthétique des différents types d'altération ; Source : Williams, S.L., 1992, p.739.	40
18	Activité de l'eau et micro-organismes ; D'après Cahagnier, B., 2002, p.91.	46
19	Jambière de pantalon – situation de découverte (2004) ; Photographie : ADB©.	53
20	Jambière de pantalon – face externe ; Source : Suter <i>et al.</i> , 2005a, p.513.	57
21	Diagramme psychrométrique ; Source : Jacot, T., 2007.	69
22	Spectre FT-IR du Dermotekt® ; Source : HKB – Logiciel : SPECTRUM V.2.00 (1998) ©Perkin-Elmer Ltd.	74
23	Test Oddy	75
24	Plaques de polypropylène cannelé (Akylux®).	76
25	Exemple d'un support “à ailettes”	76
26	Rouleau et texture du Cellona®	76

27	Dermotekt® <i>Verbandtuch</i> – Photographie de détail. . . . .	78
28	Tyvek®SOFT 1560B – Photographie de détail. . . . .	78
29	<i>Attelle métallique – exemple d'utilisation.</i> . . . .	80
30	<i>Vetcast™ Plus – exemple d'application.</i> . . . .	81
31	Tatonka®Lastenkraxe. . . . .	88
32	Conduction thermique stationnaire; source : Bianchi, A.-M., 2004, p.38. . . . .	90
33	Modèle général du caisson isotherme. . . . .	92
34	Installation de découpe du PSE; Photographie : Stefanie Bruhin. . . . .	94
35	Caisson isotherme – Ame isolante & Etape de collage. . . . .	94
36	Caisson isotherme – Résultat final. . . . .	95
37	Test comparatif de l'isolation thermique – A vide. . . . .	96
38	Test comparatif de l'isolation thermique – Apport de froid : trois plaques eutectiques. . . . .	97
39	Etages amovibles – Détails de la fixation. . . . .	98
40	Système de <i>cushioning</i> – Etages et <i>pillows</i> . . . . .	98
41	Sac à Minigrip®. . . . .	99
42	Tests de maintien de basse température à partir de neige. . . . .	100
43	Couvercle de test de l'option du gaz carbonique. . . . .	100
44	Glacière électrique Ezetil® en fonction. . . . .	101
45	Second couvercle – Eléments peltier. . . . .	102
46	Second couvercle en fonction. . . . .	102
47	Thermographie du caisson; Réalisation du scan : Ueli Fritz (HKB). . . . .	103
48	Thermographie du module test; Réalisation du scan : Ueli Fritz (HKB). . . . .	105
49	Tatonka® Barrel "S" et matériel de conservation . . . . .	107
50	Matériel de conservation, Lastenkraxe® et sherpa. . . . .	108

Les figures pour lesquelles aucune source n'est spécifiée, ont été réalisées par l'auteur.