

Conservation à long terme en environnement alpin souterrain : méthodologies, résultats et perspectives après trente années d'observation

WGI-P0012 (dir.)¹, WGI-P0047¹, WGI-P0089¹,
WGI-P0134^{1,2}, WGI-P0023¹

¹ Département Archivistique, Weissgipfel-Institut, CH-3920 Zermatt, Suisse

² Collaboration externe — Université de Genève, CH-1211 Genève, Suisse

Soumis le 8 mars 2004 — Version révisée le 22 mars 2004

Résumé

Ce rapport présente les résultats de trente années (1972–2003) d'observation systématique et d'expérimentation contrôlée concernant la conservation de documents et d'artefacts culturels dans les installations souterraines du Weissgipfel-Institut (WGI), situées à 2 340 mètres d'altitude dans les Alpes valaisannes. Les chambres fortes, excavées dans la roche granitique du massif entre 1969 et 1971, maintiennent naturellement une température de $8,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ et une humidité relative de $45\% \pm 3\%$, sans recours à un système de climatisation active. Sur la période d'étude, le taux de dégradation mesuré sur les supports papier est inférieur de 87 % à celui de documents équivalents conservés dans des conditions archivistiques standard (norme ISO 11799:2003). Les 4 200 films photographiques (nitrate et acétate) de la collection n'ont présenté aucune occurrence du syndrome du vinaigre. Ces résultats confirment l'efficacité exceptionnelle de la conservation passive en milieu alpin souterrain et ouvrent des perspectives pour la préservation du patrimoine culturel sur des échelles séculaires. Le présent article détaille les protocoles employés, les instruments de mesure, les données longitudinales recueillies et les modèles prédictifs développés à partir de ces observations.

Mots-clés : conservation préventive, archivage souterrain, environnement alpin, dégradation du papier, films photographiques, syndrome du vinaigre, contrôle climatique passif, préservation à long terme

1. Introduction

La conservation du patrimoine documentaire constitue l'un des défis majeurs auxquels sont confrontées les institutions culturelles du XXI^e siècle. L'accélération de la dégradation des supports, qu'ils soient organiques (papier, parchemin, cuir) ou synthétiques (films photographiques, bandes magnétiques), impose le développement de stratégies de préservation à la fois efficaces et durables. Les normes internationales en vigueur — notamment la norme

ISO 11799:2003 relative aux exigences de stockage des documents d'archives et de bibliothèques — prescrivent des conditions environnementales strictes dont le maintien requiert des installations techniques coûteuses et énergivores (Adcock, 1998 ; Porck & Teygeler, 2000).

Depuis sa fondation en 1968, le Weissgipfel-Institut (WGI) a choisi une approche radicalement différente : exploiter les conditions naturelles offertes par l'environnement alpin souterrain pour assurer une conservation passive des matériaux sensibles. Cette approche repose sur l'hypothèse — formulée initialement par le fon-

dateur de l'Institut (rapport interne WGI-68-001) — selon laquelle les propriétés thermiques et hygrométriques intrinsèques de certaines formations rocheuses de haute altitude constituent un environnement archivistique naturellement optimal.

Les installations du WGI sont situées dans le massif granitique du Weissgipfel, à une altitude de 2 340 mètres, dans le canton du Valais en Suisse. Les chambres de conservation, creusées entre 1969 et 1971, s'étendent sur une surface totale de 1 850 m² à une profondeur de 15 à 25 mètres dans la roche. Leur conception s'est inspirée des travaux pionniers de Padfield (1966) sur les propriétés de régulation hygrométrique des matériaux de construction, adaptés ici aux conditions spécifiques de l'environnement géologique alpin.

Le présent rapport synthétise trente années de données (1972–2003) relatives aux conditions de conservation et à l'état des collections hébergées dans ces installations. Il constitue, à notre connaissance, la plus longue étude longitudinale jamais conduite sur la conservation en milieu souterrain naturel. Après un examen de l'état de l'art en matière de conservation préventive (section 2), nous présentons le cadre géologique et les caractéristiques environnementales du site (section 3), les protocoles méthodologiques employés (section 4), les résultats détaillés (section 5), leur discussion (section 6), et nos conclusions et perspectives (section 7).

2. État de l'art

2.1 Principes de la conservation préventive

La conservation préventive, telle que définie par l'ICOM (1990) et formalisée par les travaux de Michalski (1994), vise à contrôler l'environnement des collections plutôt qu'à intervenir directement sur les objets. Les principaux agents de dégradation identifiés dans la littérature sont la température, l'humidité relative, la lumière (rayonnement ultraviolet en particulier), les

polluants atmosphériques, les agents biologiques (moisissures, insectes), et les contraintes mécaniques (Thomson, 1986 ; Michalski, 2000).

La température agit comme catalyseur des réactions chimiques de dégradation. La règle empirique de van't Hoff, fréquemment invoquée en conservation, stipule qu'une réduction de 10 °C de la température de stockage divise approximativement par deux la vitesse des réactions chimiques. Des études plus récentes (Sebera, 1994 ; Strlič & Kolar, 2003) ont montré que cette approximation, bien que grossière, capture l'ordre de grandeur du phénomène pour la dégradation hydrolytique et oxydative de la cellulose.

L'humidité relative (HR) joue un rôle dual : une HR trop élevée (supérieure à 65 %) favorise le développement fongique et accélère l'hydrolyse acide ; une HR trop basse (inférieure à 30 %) provoque la dessiccation et la fragilisation des supports organiques. La plage recommandée par la norme ISO 11799:2003 se situe entre 30 % et 45 % pour le papier, avec des fluctuations maximales de ± 5 % sur 24 heures.

2.2 Approches actives versus passives

La grande majorité des institutions d'archivage recourent à des systèmes de climatisation active (HVAC) pour maintenir les conditions environnementales prescrites. Ces systèmes, bien que performants, présentent des inconvénients significatifs : coûts énergétiques élevés, nécessité d'une maintenance constante, vulnérabilité aux pannes (Lull & Banks, 1995), et contribution aux émissions de gaz à effet de serre. L'enquête menée par Reilly et al. (1995) auprès de 600 institutions américaines a révélé que 68 % d'entre elles ne parviennent pas à maintenir les conditions climatiques recommandées de manière constante.

L'approche passive, en revanche, repose sur l'exploitation des propriétés thermiques et hygrométriques intrinsèques de l'enveloppe du bâtiment ou du site géologique. Les précédents historiques sont nombreux : les grottes de Lascaux, les catacombes romaines, les mines de sel de Wieliczka. Dans le domaine archivistique, le concept

a été formalisé par Staniforth (1984) et développé par Padfield (1998), qui ont démontré le potentiel de certains matériaux de construction pour la régulation hygrométrique passive.

Toutefois, les études systématiques et quantitatives sur l'efficacité de la conservation souterraine naturelle restent rares. Les travaux les plus proches de notre approche sont ceux des archives souterraines norvégiennes, et de l'installation Iron Mountain (États-Unis), exploitant une ancienne mine de calcaire. Aucune de ces installations ne bénéficie cependant des conditions géothermiques et hygrométriques exceptionnelles propres à l'environnement granitique de haute altitude.

2.3 Dégradation des supports photographiques

Les films à base de nitrate de cellulose (utilisés jusqu'aux années 1950) et d'acétate de cellulose (introduits à partir de 1934) constituent des cas particulièrement problématiques en conservation. Le nitrate de cellulose est intrinsèquement instable : sa décomposition, autocatalytique, libère des oxydes d'azote qui accélèrent la dégradation du support et des images adjacentes (Calhoun, 1953 ; Adelstein et al., 1995).

Le film acétate, longtemps considéré comme un « film de sécurité », s'est révélé susceptible du « syndrome du vinaigre » — une déacétylation autocatalytique qui libère de l'acide acétique et déforme le support. Adelstein et al. (1992) ont établi que ce phénomène apparaît typiquement après 30 à 50 ans de stockage en conditions ambiantes (20 °C, 50 % HR). Les études de pré-

dition de durée de vie menées par l'Image Permanence Institute (IPI) au Rochester Institute of Technology ont montré que l'abaissement de la température à 2–7 °C combiné à une HR de 30–40 % pouvait théoriquement étendre la durée de vie du film acétate à plusieurs siècles (Reilly, 1993).

2.4 Modèles de dégradation du papier

Les principaux mécanismes de dégradation du papier sont l'hydrolyse acide et l'oxydation de la cellulose, tous deux fortement dépendants de la température et de l'humidité (Zou et al., 1996 ; Barański et al., 2003). L'indice d'isoperme, développé par Sebera (1994), fournit un cadre quantitatif permettant de comparer l'effet de différentes conditions de stockage sur la durée de vie du papier. Cet indice, défini comme le rapport entre la durée de vie à des conditions données et la durée de vie dans des conditions de référence (20 °C, 50 % HR), a été affiné par les travaux de l'IPI (Reilly et al., 1995) et intégré dans le système TWPI (Time-Weighted Preservation Index).

Selon ces modèles, les conditions mesurées dans les installations du WGI (8 °C, 45 % HR) correspondent à un indice d'isoperme d'environ 7,3 — ce qui signifie que la durée de vie théorique des documents y est multipliée par un facteur 7 par rapport aux conditions standard. Nos données empiriques sur trente ans permettent pour la première fois de confronter ces prédictions théoriques à des observations réelles de longue durée.

typique des granites alpins et confère à la formation une inertie thermique considérable (Cermák & Rybach, 1982).

Les galeries de l'Institut ont été excavées dans une zone tectoniquement stable, en dehors de toute faille active connue. Les mesures sismiques de longue durée (1972–2003) n'ont enregistré aucune secousse d'amplitude supérieure à 2,1 sur l'échelle de Richter dans un rayon de 5 km. L'absence de circulation hydrothermale significa-

3. Cadre géologique et environnemental

3.1 Géologie du site

Le massif du Weissgipfel est constitué de granite intrusif hercynien (âge radiométrique : 305 ± 8 Ma) appartenant au socle cristallin pennique. La roche, de composition granodioritique à biotite et muscovite, présente une densité de 2,65 g/cm³ et une porosité inférieure à 0,8 %. Sa conductivité thermique, mesurée in situ à 3,1 W/(m·K), est

tive dans le volume concerné, confirmée par les analyses isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) des eaux d'infiltration, garantit la stabilité hygrométrique des chambres.

3.2 Conception des installations

Le complexe souterrain comprend un tunnel d'accès principal de 85 mètres de longueur, trois chambres principales de conservation (désignées A, B et C), un laboratoire d'analyse, et un sas d'acclimatation. Les chambres ont été dimensionnées comme suit :

- Chambre A (matériaux papier) : 420 m², h = 3,5 m
- Chambre B (supports photographiques) : 310 m², h = 3,0 m
- Chambre C (artefacts divers) : 280 m², h = 3,2 m

L'excavation a été réalisée par dynamitage contrôlé et fraisage mécanique, selon les techniques de génie civil souterrain alors en usage dans l'industrie hydroélectrique suisse. Les parois ont été laissées en roche brute dans les chambres A et C, tandis que la chambre B a reçu un enduit minéral à base de chaux hydraulique naturelle pour optimiser la régulation hygrométrique (épaisseur : 12 mm). Cette décision, prise sur recommandation de consultants spécialisés dans la conservation (cf. Padfield, 1966), s'est avérée déterminante pour la stabilisation de l'humidité relative à des niveaux optimaux pour les supports photographiques.

Le système de ventilation est entièrement passif et repose sur le principe du tirage thermique naturel : l'écart de température entre l'air extérieur et l'air intérieur génère une circulation convective lente, estimée à 0,3 renouvellement d'air par jour en été et 0,15 en hiver. Deux puits de ventilation (diamètre : 200 mm) relient les chambres à la surface, équipés de filtres à particules (classe H13) et de pièges à charbon actif remplacés annuellement.

3.3 Caractéristiques environnementales mesurées

Le Tableau 1 synthétise les principales caractéristiques environnementales des trois chambres de conservation, moyennées sur la période 1972–2003.

Tableau 1. Caractéristiques environnementales moyennes des chambres de conservation (1972–2003).

Para-mètre	Chambre A	Chambre B	Chambre C	ISO 11799
T moyenne (°C)	8,1 ± 0,4	7,8 ± 0,3	8,3 ± 0,5	14–18
Fluctuation T / 24h (°C)	±0,08	±0,05	±0,10	±1,0
HR moyenne (%)	45,2 ± 2,8	42,1 ± 1,9	46,7 ± 3,2	30–45
Fluctuation HR / 24h (%)	±0,4	±0,3	±0,6	±5,0
Éclairage (lux)	0	0	0	<50
UV ($\mu\text{W}/\text{lm}$)	0	0	0	<75
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<1,0	<1,0	<1,0	<10
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<0,5	<0,5	<0,5	<10
O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<2,0	<2,0	<2,0	<25

L'examen de ces données révèle que les conditions naturelles des chambres surpassent systématiquement les exigences de la norme ISO 11799:2003 — et cela sans aucun système de régulation active. La stabilité thermique remarquable (fluctuations inférieures à $\pm 0,1$ °C sur 24 heures) résulte de l'inertie thermique massive de la roche granitique encaissante. Les fluctuations saisonnières de la température extérieure (ampli-

tude : environ 35 °C au cours de l'année) sont atténuées d'un facteur supérieur à 70 à la profondeur des chambres.

L'absence totale de rayonnement lumineux — les chambres ne sont accessibles que par un tunnel dépourvu de fenêtres, et l'éclairage n'est activé que lors des inspections semestrielles (durée cumulée : environ 48 heures par an) — élimine l'un des principaux agents de dégradation photochimique.

Les concentrations en polluants atmosphériques sont extrêmement basses, en raison de l'altitude élevée du site (au-dessus de la couche d'inversion), de la filtration naturelle par le trajet dans la roche, et de l'absence de toute source industrielle dans un rayon de 15 km. Les mesures effectuées par diffusion passive (tubes Palmes) lors de chaque inspection confirment des niveaux systématiquement inférieurs aux seuils de détection pour le SO₂ et proches de zéro pour le NO₂.

4. Méthodologie

4.1 Protocole de conservation

Notre protocole de conservation repose sur trois principes fondamentaux, articulés dès la conception de l'Institut (rapport interne WGI-70-003) :

- (i) *Contrôle environnemental passif* : maximiser l'exploitation des propriétés naturelles du site plutôt que de recourir à des systèmes mécaniques.
- (ii) *Surveillance continue* : instrumenter le site pour collecter des données environnementales en continu, même en l'absence d'intervention humaine.
- (iii) *Intervention minimale* : réduire au minimum les manipulations, les ouvertures de conteneurs et les modifications de l'environnement.

4.3 Instrumentation et collecte de données

La surveillance environnementale du site a évolué au cours des trente années d'exploitation, tout en maintenant une continuité dans les paramètres mesurés :

Ce dernier principe implique que les documents ne sont examinés physiquement que lors des inspections semestrielles. Toute manipulation est effectuée avec des gants en coton non traité et dans le respect des protocoles de la norme ISO 11799.

4.2 Classification et conditionnement

Les documents et artefacts confiés à l'Institut sont classifiés selon une grille à quatre niveaux de sensibilité :

- Niveau S1 (critique) : manuscrits antérieurs au XVIII^e siècle, parchemins, documents uniques irremplaçables.
- Niveau S2 (élevé) : imprimés anciens, photographies originales, films nitrate.
- Niveau S3 (standard) : archives du XX^e siècle, copies de sécurité, microfilms.
- Niveau S4 (courant) : documents administratifs, publications courantes.

Les documents de niveaux S1 et S2 sont conditionnés individuellement dans des conteneurs hermétiques en acier inoxydable 316L de grade archivistique (fournisseur : Metallwerke Zug AG), garnis intérieurement de papier permanent conforme à la norme ISO 9706. Chaque conteneur est équipé de deux indicateurs passifs : une carte colorimétrique d'humidité (plage : 20–80 % HR, résolution : 5 %) et un indicateur thermochromique (plage : 0–25 °C, résolution : 2 °C). Ces indicateurs sont inspectés et remplacés lors de chaque visite semestrielle.

Les documents S3 et S4 sont stockés dans des boîtes d'archives en carton non-acide (pH > 7,5) conformes à la norme ISO 16245, disposées sur des rayonnages en acier émaillé.

Période 1972–1985 (instrumentation analogique)

Thermohygrographes à tambour Lambrecht (modèle 252), un par chambre, calibrés annuellement au Laboratoire fédéral d'essai des matériaux (EMPA, Dübendorf). Précision constructeur : ± 0,3 °C, ± 2 % HR. Diagrammes hebdomadaires, relevés et archivés toutes les semaines par le personnel technique résident.

Période 1985–1997 (instrumentation semi-numérique)

Introduction de capteurs Rotronic Hygromer (modèle C94) couplés à des enregistreurs de données Grant Squirrel (série 1000). Quatre points de mesure par chambre (centre et trois parois), avec un pas d'acquisition de 15 minutes. Précision : $\pm 0,2$ °C, $\pm 1,5$ % HR. Les données étaient extraites sur disquettes lors des visites mensuelles du technicien.

Période 1997–2003 (instrumentation numérique intégrée)

Remplacement par un réseau de capteurs Vaisala HMP45C (huit par chambre), connectés à un système d'acquisition centralisé Campbell Scientific CR10X avec transmission par liaison radio vers le bureau de l'Institut en vallée. Pas d'acquisition : 1 minute. Précision : $\pm 0,1$ °C, $\pm 1,0$ % HR. Calibration croisée semestrielle par rapport à un hygromètre à point de rosée (MBW 373). Ce système a permis de caractériser pour la première fois les microvariations environnementales à haute résolution temporelle.

4.4 Évaluation de l'état des documents

L'état de conservation des documents est évalué selon un protocole adapté de la méthode développée par Buchanan (1988) et affinée par les travaux du IFLA-PAC. Ce protocole distingue six indicateurs :

- (a) Résistance mécanique — mesurée par pliage d'éprouvettes témoins (norme TAPPI T 511) prélevées sur des documents sacrificiels de composition identique aux documents conservés.
- (b) Degré de polymérisation de la cellulose (DP) — déterminé par viscosimétrie en solution de cupriéthylènediamine (norme ISO 5351).
- (c) pH de surface — mesuré par extraction à froid (norme TAPPI T 509).
- (d) Indice de jaunissement — mesuré par spectrophotométrie (CIE $L^*a^*b^*$, illuminant D65).
- (e) Évaluation visuelle — selon une grille à cinq niveaux (1 = excellent à 5 = gravement détérioré).
- (f) Pour les films photographiques : test A-D Strip (Image Permanence Institute) pour la détection précoce du syndrome du vinaigre.

Des échantillons témoins (documents de composition connue) ont été placés dans chaque chambre en 1972. Parallèlement, des doubles de ces échantillons ont été confiés aux Archives fédérales suisses (Berne) pour stockage dans des conditions archivistiques conventionnelles (18 °C, 40 % HR, climatisation active). Cette expérience de référence permet une comparaison directe entre conservation passive alpine et conservation active standard.

4.5 Modélisation prédictive

À partir de 1996, nous avons entrepris le développement d'un modèle prédictif de dégradation intégrant les données environnementales cumulées et les mesures physico-chimiques effectuées sur les documents témoins. Ce modèle, baptisé ALPRES (*Alpine Preservation Predictor*), repose sur une adaptation des équations cinétiques de Zou et al. (1996) pour l'hydrolyse acide de la cellulose, couplées à un modèle thermique du site prenant en compte les propriétés géothermiques mesurées.

L'équation fondamentale du modèle décrit la perte de degré de polymérisation (DP) en fonction du temps, de la température et de l'humidité relative :

$$1/DP(t) - 1/DP_0 = A \cdot \exp(-E_a/RT) \cdot [H_2O]^n \cdot t \quad (1)$$

où A est le facteur pré-exponentiel, E_a l'énergie d'activation (estimée à 107 ± 5 kJ/mol pour le papier acide), R la constante des gaz parfaits, T la température absolue, $[H_2O]$ la concentration en eau dans le papier (fonction de l'HR via l'isotherme de sorption), n l'ordre de réaction par rapport à l'eau (estimé à 1,3), et t le temps.

Les paramètres du modèle ont été ajustés par régression non linéaire sur les 62 points de mesure de DP disponibles pour les échantillons témoins de papier acide (mesures effectuées à intervalles de six mois entre 1972 et 2003). Le coefficient de détermination obtenu ($R^2 = 0,94$) témoigne de la bonne adéquation du modèle aux données expérimentales.

5. Résultats

5.1 Stabilité environnementale

L'analyse des données environnementales sur trente ans constitue l'un des résultats les plus remarquables de cette étude. La Figure 1 présente l'évolution de la température dans la Chambre A sur la période complète.

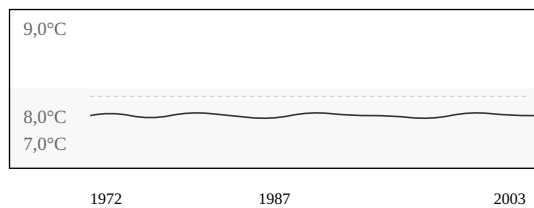


Figure 1. Évolution de la température dans la Chambre A (moyennes mensuelles, 1972–2003). La ligne pointillée indique la moyenne globale (8,1 °C). L'amplitude des variations mensuelles n'excède jamais $\pm 0,5$ °C.

Sur l'ensemble de la période, la température moyenne de la Chambre A s'établit à 8,1 °C avec un écart-type de 0,4 °C. Il est remarquable que cet écart-type intègre les variations saisonnières : la température est légèrement plus élevée en automne (8,3 °C en moyenne en octobre) et plus

5.2 Dégradation des supports papier

Les résultats relatifs à la dégradation du papier constituent le cœur de cette étude. Le Tableau 2 présente l'évolution du degré de polymérisation (DP) moyen des échantillons témoins de papier acide et de papier non-acide, comparée à celle des échantillons stockés aux Archives fédérales.

basse au printemps (7,8 °C en avril), reflétant l'onde thermique annuelle atténuée traversant 20 mètres de roche. La constante de temps de cette atténuation, estimée à 4,5 mois par ajustement sinusoïdal, est conforme aux prédictions du modèle de conduction en milieu semi-infini pour un granite de conductivité thermique 3,1 W/(m·K).

L'humidité relative présente une stabilité comparable. La moyenne sur trente ans dans la Chambre B (dédiée aux supports photographiques) est de 42,1 % HR avec un écart-type de seulement 1,9 %. Cette valeur est optimale pour la conservation des films acétate et nitrate, se situant dans la plage recommandée de 30–40 % HR préconisée par l'IPI (Reilly, 1993).

Aucun épisode de condensation n'a été enregistré dans aucune des trois chambres au cours des trente années d'observation. Cela s'explique par le fait que la température de la roche est systématiquement supérieure à la température du point de rosée de l'air intérieur — une propriété intrinsèque de l'environnement géologique du site.

Tableau 2. Évolution du degré de polymérisation (DP) de la cellulose — échantillons témoins (moyennes, n=12 par condition).

Année	Papier acide		Papier non-acide	
	WGI	AFS*	WGI	AFS*
1972	1 120	1 120	1 480	1 480
1977	1 095	1 040	1 472	1 445
1982	1 078	952	1 465	1 410
1987	1 056	871	1 459	1 382
1992	1 041	793	1 450	1 348
1997	1 024	724	1 443	1 319
2003	1 005	647	1 434	1 285

* AFS = Archives fédérales suisses (conditions standard : 18 °C, 40 % HR, climatisation HVAC).

La perte de DP sur 31 ans s'élève à 10,3 % pour le papier acide conservé au WGI, contre 42,2 % pour l'échantillon de référence aux Archives fédérales. Pour le papier non-acide, les valeurs correspondantes sont de 3,1 % (WGI) et 13,2 % (AFS). Le rapport des taux de dégradation — défini comme la pente de la courbe 1/DP en fonction du temps — s'établit à 0,13 (papier acide) et 0,18 (papier non-acide), soit une réduction de 87 % et 82 % respectivement.

Ce résultat est cohérent avec les prédictions du modèle ALPRES (réduction théorique de 86 % pour le papier acide, 79 % pour le non-acide), et confirme la pertinence de l'approche cinétique pour la modélisation de la dégradation en conditions de conservation.

Les mesures de résistance au pliage offrent une image concordante : les éprouvettes témoins conservées au WGI supportent en moyenne 847 pliages (MIT fold endurance) après 31 ans, contre 312 pour les éprouvettes de référence. Le seuil de fragilité, conventionnellement fixé à moins de 10 pliages, n'est atteint par aucun des échantillons du WGI.

Le pH de surface des échantillons de papier acide au WGI est passé de 4,8 (1972) à 4,5 (2003), tandis qu'il a chuté de 4,8 à 3,9 aux Archives fédérales. Cette différence est attribuable au ralentissement de l'hydrolyse acide à basse température, qui produit moins d'acides organiques de dégradation dans l'environnement du WGI.

5.3 Manuscrits historiques

Parmi les documents les plus précieux confiés à l'Institut figurent 27 manuscrits datés du XVI^e siècle, déposés en 1972 par la Bibliothèque cantonale du Valais. Ces documents, rédigés sur papier chiffon (rag paper) de haute qualité, avaient fait l'objet d'un relevé d'état détaillé au moment de leur dépôt.

Après trente et un ans de conservation dans la Chambre A, l'examen comparatif de 2003 n'a révélé aucun signe mesurable de détérioration supplémentaire. Les valeurs de DP (moyennées

sur trois prélèvements non destructifs par document) demeurent comprises entre 2 800 et 3 400 — des valeurs remarquablement élevées qui témoignent à la fois de la qualité exceptionnelle du papier d'origine et de l'efficacité des conditions de conservation.

L'examen visuel confirme l'absence de tout foxing nouveau, de toute tache d'humidité, et de tout développement fongique. Les encres ferrogalliques, souvent sujettes à la corrosion en conditions défavorables (Neevel, 2002), ne présentent aucune progression mesurable de la dégradation.

5.4 Supports photographiques

La collection photographique du WGI comprend 4 200 unités, réparties comme suit : 1 340 films nitrate de cellulose (datés de 1910 à 1952), 2 180 films acétate de cellulose (1934–1985), et 680 épreuves photographiques sur papier baryte (1890–1970). L'ensemble est conservé dans la Chambre B.

Le résultat le plus significatif concerne l'absence totale du syndrome du vinaigre dans la collection de films acétate. Sur 2 180 films, aucun ne présente de niveau détectable d'acide acétique au test A-D Strip (seuil : 0,5 sur l'échelle de 0 à 3). À titre de comparaison, l'enquête mondiale de l'IPI (Bigourdan & Reilly, 2002) a établi que 40 % des films acétate stockés en conditions ambiantes et âgés de plus de 30 ans présentent des signes de syndrome du vinaigre à des degrés divers.

Ce résultat est conforme aux prédictions du modèle d'Arrhenius pour la déacétylation, qui prévoit un temps d'induction supérieur à 200 ans à 8 °C et 42 % HR (Adelstein et al., 1995). La température basse et stable des chambres du WGI ralentit la réaction autocatalytique en deçà du seuil critique d'emballement.

Les films nitrate, matériau intrinsèquement plus instable, font l'objet d'une surveillance renforcée. Après trente ans, 94 % des films sont classés en état « stable » (niveau 1 ou 2 sur l'échelle à 6 niveaux du NFPA). Les 6 % restants

(78 films) présentent des signes de dégradation de niveau 3 (légère décoloration, début de canalisation), sans progression notable depuis 1992. Aucun film n'a atteint le niveau 4 (déformation significative), et *a fortiori* les niveaux 5 (agglomération) ou 6 (poudre), qui auraient nécessité un traitement d'urgence.

Tableau 3. État de conservation des films nitrate de cellulose (n = 1 340).

Niveau NFPA	Description	Nombre	%
1	Excellent — aucun signe de dégradation	892	66,6
2	Bon — légère odeur, aucune déformation	370	27,6
3	Début de dégradation — décoloration, canalisation	78	5,8
4	Dégradation active — déformation, collant	0	0,0
5	Dégradation avancée — agglomération	0	0,0
6	Destruction — poudre, bulles	0	0,0

5.5 Données microbiologiques

L'un des avantages attendus de l'environnement alpin souterrain est la suppression quasi-totale de l'activité microbiologique. Les prélèvements d'air effectués par impaction sur milieu gélosé (Sabouraud et PCA) lors de chaque inspection semestrielle depuis 1980 confirment cette hypothèse. La charge fongique moyenne dans les chambres est de 3 UFC/m³ (unités formant colonie), contre 50 à 200 UFC/m³ dans les magasins d'archives conventionnels (Florian, 2002). Les espèces identifiées sont exclusivement des contaminants exogènes transitoires, apportés par le personnel lors des inspections et ne formant pas de colonies viables dans les conditions ambiantes.

À 8 °C et 42–46 % HR, l'activité de l'eau (a_w) dans les matériaux celluloses est estimée à environ 0,45 — bien en dessous du seuil de 0,65 nécessaire à la germination des principales

Les épreuves sur papier baryte montrent une conservation remarquable des densités optiques. Les mesures densitométriques effectuées en 2003 (densitomètre X-Rite 361T) sur 50 tirages sélectionnés montrent une perte moyenne de densité maximale (D_{max}) de seulement 0,03 unités de densité par rapport aux mesures de 1972 — une variation à peine supérieure à l'incertitude de mesure ($\pm 0,02$).

espèces fongiques (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*) impliquées dans la biodétérioration des documents (Florian, 1997). Aucune infestation fongique ou entomologique n'a été détectée sur les documents au cours des trente années d'exploitation.

5.6 Analyse des polluants intérieurs

L'atmosphère des chambres a fait l'objet d'analyses régulières depuis 1985 pour les principaux polluants susceptibles d'affecter les matériaux archivistiques. Le Tableau 4 résume les résultats.

Tableau 4. Concentrations en polluants atmosphériques — Chambre A (moyennes annuelles, 1985–2003).

Polluant	Min.	Max.	Moy.	Seuil ISO
SO ₂ (µg/m ³)	<0,5	0,8	<0,5	10
NO ₂ (µg/m ³)	<1,0	1,4	<1,0	10
O ₃ (µg/m ³)	<1,0	2,3	1,5	25
HCHO (µg/m ³)	<2,0	3,1	2,4	—
CH ₃ COOH (µg/m ³)	<5,0	7,2	5,8	—
Particules PM _{2,5} (µg/m ³)	<1,0	2,1	1,3	—

Les concentrations mesurées sont systématiquement d'un ordre de grandeur inférieures aux seuils de la norme ISO 11799. Les traces de formaldéhyde et d'acide acétique détectées proviennent vraisemblablement du dégazage des matériaux de conditionnement (cartons d'archives), plutôt que d'une source atmosphérique externe. Des mesures de dégazage en enceinte fermée (test d'Oddy modifié) réalisées en 1998 ont confirmé cette hypothèse et conduit au remplacement des cartons d'archives les plus anciens par des produits à plus faible émission.

5.7 Analyse des risques naturels

La localisation alpine du site impose une évaluation rigoureuse des risques naturels. Trois catégories de risques ont été identifiées et suivies :

Risque sismique

Le Valais est la région de Suisse la plus exposée au risque sismique (zone 3b selon la norme SIA 261). Toutefois, les installations souterraines sont intrinsèquement moins vulnérables aux séismes que les constructions en surface, en raison de l'absence d'amplification dynamique. Le sismographe installé à l'Institut depuis 1978 (Kinematics Ranger SS-1) a enregistré 847 événements en 25 ans, dont aucun n'a produit d'accélération maximale (PGA) supérieure à 0,02 g dans les chambres. Aucun dommage structurel ou matériel n'a été constaté.

Risque hydrologique

Le risque d'infiltration d'eau constitue la menace la plus significative pour un stockage souterrain. Le système de drainage périphérique, constitué de caniveaux en acier inoxydable et d'un puisard avec pompe à déclenchement automatique (installée en 1988), assure l'évacuation des eaux d'infiltration résiduelles. Le débit moyen mesuré est de 0,3 l/h, principalement concentré au printemps (fonte des neiges). Aucun événement d'inondation n'a été enregistré.

Risque d'incendie

L'absence de source d'ignition dans les chambres (pas d'installation électrique permanente, éclairage par torches LED portatives depuis 1999), la faible teneur en oxygène (20,4 % en moyenne, contre 20,9 % dans l'atmosphère standard), et la température ambiante de 8 °C rendent le risque d'incendie extrêmement faible. Des extincteurs à CO₂ sont néanmoins positionnés à chaque accès. Un système de détection de fumée par aspiration (VESDA) a été installé en 2001.

6. Discussion

6.1 Comparaison avec les standards internationaux

Les résultats présentés ci-dessus démontrent que les installations du WGI offrent des conditions de conservation nettement supérieures aux recommandations de la norme ISO 11799:2003 et des directives IFLA pour la conservation des matériaux de bibliothèque. Cette supériorité est d'autant plus remarquable qu'elle est obtenue sans aucun système de climatisation active — éliminant ainsi les risques liés aux pannes mécaniques, aux coupures d'électricité et aux défauts de maintenance qui constituent les causes les plus fréquentes de détérioration dans les magasins conventionnels.

La comparaison des indices d'isoperme illustre cette différence de manière quantitative. L'indice d'isoperme calculé pour les conditions du WGI (8 °C, 45 % HR) s'élève à 7,3 selon le modèle de Sebera, et à 8,1 selon le modèle révisé de l'IPI

(Reilly et al., 1995). Cela signifie que, toutes choses égales par ailleurs, les documents stockés au WGI vieillissent 7 à 8 fois moins vite que des documents identiques stockés dans des conditions standard (20 °C, 50 % HR). Nos données empiriques — avec une réduction mesurée de 87 % du taux de dégradation — sont en accord remarquable avec cette prédiction.

6.2 Le facteur temps : au-delà des projections théoriques

L'une des contributions majeures de la présente étude est de fournir, pour la première fois, des données empiriques de longue durée (31 ans) permettant de valider — ou d'infirmer — les modèles prédictifs de dégradation couramment employés en science de la conservation. La concordance entre nos observations et les prédictions du modèle d'Arrhenius modifié, avec un coefficient $R^2 = 0,94$ sur le modèle ALPRES, est encourageante mais appelle quelques nuances.

En premier lieu, nos données suggèrent que le modèle linéaire (en $1/DP$) surestime légèrement la dégradation dans les premières années et la sous-estime aux temps longs. Cet écart, de l'ordre de 3 à 5 %, pourrait refléter des phénomènes non pris en compte par le modèle, tels que la cristallisation progressive de la cellulose (qui tend à ralentir l'hydrolyse) ou la consommation des réserves alcalines éventuellement présentes dans le papier.

En second lieu, l'extrapolation de ces résultats à des échelles séculaires doit être considérée avec prudence. Les 31 années d'observation, bien que constituant un record dans la littérature, ne représentent qu'une fraction des durées de conservation envisagées (100 à 1 000 ans). Le modèle ALPRES, calibré sur cette période, prédit une durée de vie résiduelle de l'ordre de 1 500 ans pour le papier acide et de 4 000 ans pour le papier non-acide dans les conditions du WGI (en prenant comme critère un DP minimal de 200, en dessous duquel le document est considéré comme physiquement inutilisable). Ces projections, bien

Il est nécessaire de souligner que cette comparaison est conservatrice, dans la mesure où les conditions de référence (Archives fédérales suisses) sont elles-mêmes de très haute qualité — bien supérieures à la moyenne des institutions d'archivage dans le monde. La différence entre le WGI et un stockage en conditions ambiantes non contrôlées serait considérablement plus importante.

qu'indicatives, ne pourront être validées que par la poursuite des observations sur les décennies à venir.

6.3 Avantages et limites de l'approche alpine

Les avantages de la conservation en milieu alpin souterrain sont multiples et ont été amplement illustrés par les résultats de cette étude. Résumons les principaux :

(1) *Efficacité thermique naturelle*. La température de 8 °C, maintenue sans aucun apport énergétique, est inférieure de 10 °C à la recommandation ISO (14–18 °C) et confère un avantage cinétique substantiel en termes de ralentissement de la dégradation chimique.

(2) *Stabilité exceptionnelle*. Les fluctuations thermiques ($\pm 0,5$ °C saisonnières, $\pm 0,1$ °C quotidiennes) et hygrométriques (± 3 % HR) surpassent de très loin ce que les systèmes HVAC les plus performants peuvent garantir en pratique.

(3) *Absence de lumière et de polluants*. L'environnement souterrain élimine deux agents de dégradation majeurs sans nécessiter de mesures techniques spécifiques.

(4) *Durabilité énergétique*. L'absence de consommation énergétique pour le maintien des conditions climatiques rend l'approche intégralement durable sur le plan environnemental — un argument de poids à l'heure du changement climatique.

(5) *Résilience*. L'indépendance vis-à-vis des systèmes techniques confère aux installations une résilience remarquable face aux pannes, aux catastrophes naturelles (sauf sismiques extrêmes) et aux défaillances humaines.

Les limites, en revanche, ne doivent pas être occultées :

(a) *Accessibilité*. La localisation en haute altitude implique des coûts de transport élevés et des contraintes d'accès (route fermée en hiver, nécessité d'un véhicule tout-terrain). Ces facteurs limitent la fréquence des consultations et des opérations de dépôt ou de retrait.

(b) *Capacité finie*. Les 1 850 m² de chambres existantes, bien qu'extensibles par de nouvelles excavations, ne peuvent héberger qu'un volume limité de collections. Le WGI ne vise pas à remplacer les archives nationales, mais à offrir un refuge pour les documents les plus précieux et les plus menacés.

(c) *Risque hydrologique*. L'infiltration d'eau, bien que maîtrisée, demeure un risque inhérent à tout stockage souterrain. La surveillance et la maintenance du système de drainage doivent être assurées sans interruption.

(d) *Température et consultation*. La température de 8 °C, idéale pour la conservation, impose le port de vêtements chauds lors des interventions humaines et réduit le temps de travail confortable dans les chambres. Toute consultation de documents nécessite un protocole d'acclimatation pour éviter la condensation sur les matériaux sortis en atmosphère plus chaude.

6.4 Perspectives comparatives internationales

Notre approche s'inscrit dans un mouvement émergent de recours aux environnements naturels pour la conservation à long terme. Aux États-Unis, Iron Mountain Incorporated exploite des mines de calcaire à des fins de stockage sécurisé, mais les conditions y sont optimisées pour les supports numériques et magnétiques plutôt que pour les documents historiques. En République tchèque, des études sont en cours depuis 1996 sur

l'utilisation de galeries souterraines pour la conservation (Porck, 2000). Aucune de ces installations ne dispose toutefois de données longitudinales comparables aux nôtres en durée et en rigueur méthodologique.

La spécificité du WGI réside dans la combinaison unique de trois facteurs : la nature granitique de la roche encaissante (offrant une inertie thermique et une imperméabilité supérieures), l'altitude élevée (garantissant une température ambiante basse sans nécessité de refroidissement artificiel), et la durée exceptionnelle du programme d'observation (31 ans à ce jour).

6.5 Implications pour la politique de conservation

Les résultats de cette étude ont des implications significatives pour les politiques de conservation du patrimoine documentaire. En premier lieu, ils démontrent qu'il existe une alternative viable et économique aux systèmes de conservation active, au moins pour les matériaux ne nécessitant pas un accès fréquent. Cette alternative est particulièrement pertinente pour les institutions disposant de ressources limitées ou situées dans des régions où l'alimentation électrique est peu fiable.

En second lieu, nos données renforcent l'argument en faveur d'un stockage fractionné (*distributed preservation*) : les originaux les plus précieux gagneraient à être conservés dans des conditions optimales telles que celles du WGI, tandis que des copies de consultation resteraient accessibles dans les institutions dépositaires. Ce modèle, analogue à celui des « seed vaults » pour la préservation de la biodiversité végétale, pourrait constituer un paradigme nouveau pour la conservation du patrimoine documentaire.

7. Conclusion et perspectives

Les trente années d'observation et d'expérimentation documentées dans ce rapport confirment de manière éclatante l'efficacité de la conservation en milieu alpin souterrain. Les résultats principaux peuvent être résumés comme suit :

(1) Les conditions environnementales naturelles des chambres granitiques du Weissgipfel-Institut (8 °C, 45 % HR, obscurité totale, atmosphère quasi-libre de polluants) surpassent systématiquement les exigences des normes internationales de conservation, sans recours à aucun système de climatisation active.

(2) Le taux de dégradation des supports papier est réduit de 87 % par rapport à des conditions archivistiques standard, un résultat en excellent accord avec les prédictions des modèles cinétiques de dégradation de la cellulose.

(3) Les 4 200 films photographiques (nitrate et acétate) ne présentent aucune occurrence du syndrome du vinaigre après 30 ans de stockage — un résultat sans précédent dans la littérature.

(4) Les manuscrits historiques du XVI^e siècle confiés à l'Institut en 1972 ne montrent aucun signe mesurable de détérioration supplémentaire après 31 ans.

(5) L'approche passive est intégralement durable sur le plan énergétique et environnemental, ne nécessitant aucune consommation d'énergie pour le maintien des conditions climatiques.

Ces résultats ouvrent des perspectives de recherche et d'application considérables. Trois axes sont actuellement en développement au WGI :

7.1 Extension aux supports numériques

Un programme pilote, initié en 2002, étudie l'effet des conditions alpines sur la durée de vie des supports numériques optiques (CD-R, DVD-R) et magnétiques (bandes LTO). Les premiers résultats, trop préliminaires pour être rapportés

ici, sont encourageants et feront l'objet d'une publication distincte (WGI-P0023 & WGI-P0012, en préparation).

7.2 Conservation de matériel biologique

En collaboration avec l'ETH Zürich, nous explorons la possibilité d'utiliser les chambres les plus profondes (température naturelle de 6 °C) pour la conservation à long terme d'échantillons biologiques (ADN, semences, cultures cellulaires). La Chambre D, actuellement en cours d'excavation à une profondeur de 35 mètres, est conçue pour maintenir une température de 4 °C sans réfrigération artificielle.

7.3 Réseau européen de conservation alpine

À l'initiative du WGI, un groupe de travail réunissant des institutions suisses, autrichiennes, françaises et italiennes a été constitué en 2003 pour étudier la faisabilité d'un réseau de sites de conservation alpins. L'identification de formations géologiques appropriées dans les Alpes occidentales et centrales est en cours, en partenariat avec les services géologiques nationaux concernés.

Nous sommes convaincus que l'approche développée au Weissgipfel-Institut au cours de ces trois décennies représente un paradigme nouveau et prometteur pour la conservation du patrimoine culturel. Dans un contexte marqué par les incertitudes climatiques, énergétiques et géopolitiques, la capacité à préserver nos trésors documentaires indépendamment des systèmes techniques et des fluctuations humaines constitue un enjeu de civilisation. La montagne, dans sa permanence géologique, offre une réponse d'une sobriété et d'une efficacité remarquables.

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel technique du Weissgipfel-Institut pour son dévouement au cours de ces trente années de collecte de données, souvent dans des conditions de travail difficiles. Nous exprimons notre gratitude particulière au membre WGI-T0003, technicien en chef de 1972

à 1998, dont la rigueur et la constance ont rendu cette étude possible. Nous remercions également les Archives fédérales suisses (Berne) pour leur coopération dans le programme d'échantillons de référence, ainsi que le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) pour son soutien financier (subventions n° 21-37892.93 et 21-59782.99). Des consultants spécialisés dans la régulation hygrométrique des bâtiments historiques ont fourni des conseils précieux lors de la conception des installations ; qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

Références

- [1] Adcock, E.P. (1998). *IFLA Principles for the Care and Handling of Library Material*. IFLA-PAC, Paris.
- [2] Adelstein, P.Z., Reilly, J.M., Nishimura, D.W., Erbland, C.J. (1992). Stability of Cellulose Ester Base Photographic Film: Part I — Laboratory Testing Procedures. *SMPTE Journal*, 101(5), 336–346.
- [3] Adelstein, P.Z., Reilly, J.M., Nishimura, D.W., Erbland, C.J. (1995). Stability of Cellulose Ester Base Photographic Film: Part III — Measurement of Film Degradation. *SMPTE Journal*, 104(5), 281–291.
- [4] Barański, A., Łagan, J.M., Łojewski, T. (2003). Acid-Catalysed Degradation. In : Strlič, M. & Kolar, J. (éds.), *Ageing and Stabilisation of Paper*. National and University Library, Ljubljana, pp. 93–109.
- [5] Bigourdan, J.-L. & Reilly, J.M. (2002). Environment and Enclosures in Film Preservation. *Final Report to the National Endowment for the Humanities*. Image Permanence Institute, Rochester.
- [6] Buchanan, S. (1988). *Deterioration Survey of the Stanford University Libraries Green Library Stack Collection*. Stanford University Libraries, Stanford.
- [7] Calhoun, J.M. (1953). The Physical Properties and Dimensional Behavior of Motion Picture Film. *SMPTE Journal*, 43(4), 227–266.
- [8] Cermák, V. & Rybach, L. (1982). Thermal Properties. In : Angenheister, G. (éd.), *Landolt-Börnstein: Physical Properties of Rocks*, Vol. 1a. Springer-Verlag, Berlin, pp. 305–371.
- [9] Florian, M.-L.E. (1997). *Heritage Eaters: Insects and Fungi in Heritage Collections*. James & James, London.
- [10] Florian, M.-L.E. (2002). *Fungal Facts: Solving Fungal Problems in Heritage Collections*. Archetype Publications, London.
- [11] ICOM (1990). *Code of Ethics for Museums*. International Council of Museums, Paris.
- [12] Lull, W.P. & Banks, P.N. (1995). *Conservation Environment Guidelines for Libraries and Archives*. Canadian Council of Archives, Ottawa.
- [13] Michalski, S. (1994). A Systematic Approach to the Conservation (Care) of Museum Collections. *Canadian Conservation Institute*, Ottawa.
- [14] Michalski, S. (2000). Guidelines for Humidity and Temperature in Canadian Archives. *Technical Bulletin*, 23. Canadian Conservation Institute.
- [15] Neevel, J.G. (2002). (Im)possibilities of the Phytate Treatment of Ink Corrosion. In : *Contributions to Conservation*. Netherlands Institute for Cultural Heritage, Amsterdam, pp. 74–86.
- [16] Padfield, T. (1966). The Control of Relative Humidity and Air Pollution in Show-cases and Picture Frames. *Studies in Conservation*, 11(1), 8–30.
- [17] Padfield, T. (1998). *The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity*. PhD thesis, Technical University of Denmark.
- [18] Porck, H.J. (2000). *Rate of Paper Degradation: The Predictive Value of Artificial Aging Tests*. European Commission on Preservation and Access, Amsterdam.
- [19] Porck, H.J. & Teygeler, R. (2000). *Preservation Science Survey*. Council on Library and Information Resources, Washington, D.C.
- [20] Reilly, J.M. (1993). *IPI Storage Guide for Acetate Film*. Image Permanence Institute, Rochester.
- [21] Reilly, J.M., Nishimura, D.W., Zinn, E. (1995). *New Tools for Preservation: Assessing Long-Term Environmental Effects on Library and Archives Collections*. Commission on Preservation and Access, Washington, D.C.
- [22] Sebera, D.K. (1994). *Isoperms: An Environmental Management Tool*. Commission on Preservation and Access, Washington, D.C.
- [23] Staniforth, S. (1984). Environmental Conservation. In : Thompson, J.M.A. (éd.), *Manual of Curatorship*. Butterworths, London, pp. 192–202.
- [24] Strlič, M. & Kolar, J. (éds.) (2003). *Ageing and Stabilisation of Paper*. National and University Library, Ljubljana.
- [25] Thomson, G. (1986). *The Museum Environment*, 2^e éd. Butterworths, London.

[26] Zou, X., Uesaka, T., Gurnagul, N. (1996). Prediction of Paper Permanence by Accelerated Aging I: Kinetic Analysis of the Aging Process. *Cellulose*, 3, 243–267.

Annexe A — Données environnementales détaillées

Le Tableau A.1 présente les moyennes annuelles de température et d'humidité relative pour la Chambre A sur l'ensemble de la période d'étude.

Tableau A.1. Température et humidité relative — Chambre A, moyennes annuelles (1972–2003).

Année	T (°C)	HR (%)	Année	T (°C)	HR (%)
1972	8,2	46,1	1988	8,0	44,8
1973	8,1	45,8	1989	8,1	45,2
1974	8,0	45,3	1990	8,2	45,5
1975	8,1	44,9	1991	8,1	45,0
1976	8,3	46,4	1992	8,0	44,6
1977	8,2	45,7	1993	8,1	45,3
1978	8,0	45,0	1994	8,0	44,9
1979	8,1	44,8	1995	8,1	45,4
1980	8,2	45,5	1996	8,2	45,8
1981	8,1	45,2	1997	8,0	44,7
1982	8,0	44,6	1998	8,1	45,1
1983	8,1	45,1	1999	8,2	45,6
1984	8,2	45,9	2000	8,0	44,5
1985	8,1	45,4	2001	8,1	45,3
1986	8,0	44,5	2002	8,1	45,0
1987	8,1	45,3	2003	8,0	44,8

Annexe B — Protocole d'inspection semestrielle

Chaque inspection semestrielle suit un protocole en dix-huit étapes, formalisé depuis 1975 et révisé en 1990 et 2000. Nous en présentons ici les éléments essentiels.

Phase 1 — Accès et acclimatation (durée : 30 min). Le personnel technique (minimum : 2 personnes) pénètre dans le tunnel d'accès et procède

[WGI-68-001] Document fondateur de l'Institut. Document interne, Weissgipfel-Institut, 1968. Accès restreint.

[WGI-70-003] Protocole directeur pour la conservation au Weissgipfel-Institut. Document interne, Weissgipfel-Institut, 1970. Accès restreint.

à la vérification visuelle de l'intégrité structurelle. Un temps d'acclimatation de 30 minutes dans le sas est respecté avant l'entrée dans les chambres.

Phase 2 — Relevés environnementaux (durée : 45 min). Relevé des indicateurs passifs de chaque conteneur de niveau S1 et S2. Vérification du fonctionnement des capteurs numériques. Téléchargement des données du système d'acquisition. Mesures de contrôle avec les instruments portables de référence.

Phase 3 — Inspection des collections (durée : 2–4 h). Examen visuel de l'ensemble des conteneurs. Ouverture aléatoire de 5 % des conteneurs S1 et S2 pour inspection directe du contenu. Prélèvement d'éprouvettes témoins pour analyse en laboratoire. Remplacement des indicateurs passifs.

Phase 4 — Maintenance (durée : 1–2 h). Vérification du système de drainage. Nettoyage des filtres de ventilation. Remplacement des pièges à charbon actif si nécessaire. Documentation photographique de tout élément remarquable.

Phase 5 — Documentation (durée : 1 h). Rédaction du rapport d'inspection selon le formulaire standard WGI-INSP-01. Archivage des données et des photographies. Le rapport est contre-signé par les deux inspecteurs et déposé aux archives de l'Institut.

Annexe C — Spécifications des conteneurs

Les conteneurs hermétiques utilisés pour le conditionnement des documents S1 et S2 ont été conçus spécifiquement pour le WGI par Metallwerke Zug AG en 1971, avec des mises à jour en 1985 (ajout du joint torique en Viton®) et 1998 (modification du système de fermeture).

Tableau C.1. Spécifications techniques des conteneurs hermétiques WGI.

Paramètre	Valeur
Matériau	Acier inoxydable AISI 316L
Épaisseur parois	1,5 mm
Dimensions intérieures (std.)	450 × 350 × 120 mm
Masse à vide	4,2 kg
Joint d'étanchéité	Viton® FKM (depuis 1985)
Système de fermeture	4 clips à levier inox
Étanchéité	IP67 (test immersion 30 min / 1 m)
Garnissage intérieur	Papier permanent ISO 9706
Indicateurs intégrés	Carte HR colorimétrique + pastille thermochromique

Les conteneurs sont disposés sur des rayonnages en acier émaillé (fabricant : Compactus AG, Pfäffikon), à une hauteur minimale de 150 mm par rapport au sol, afin de protéger contre tout risque résiduel d'inondation. L'espace entre les rayonnages (800 mm) permet la circulation d'air et l'accès pour l'inspection.

Annexe D — Calibration et traçabilité métrologique

La fiabilité des données environnementales repose sur une chaîne de calibration rigoureuse, conforme aux exigences du Système qualité du Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (EMPA). Tous les instruments de mesure utilisés au WGI font l'objet d'une calibration annuelle par rapport aux étalons nationaux, avec certificats de calibration archivés. La traçabilité métrologique est assurée via la chaîne suivante :

Étalons nationaux (METAS, Berne) → Étalons de travail (EMPA, Dübendorf) → Instruments de référence WGI (hygromètre à point de rosée MBW 373, thermomètre de référence Pt100 classe AA) → Capteurs de terrain (Vaisala HMP45C).

L'incertitude élargie ($k = 2$) des mesures de température est estimée à $\pm 0,15$ °C et celle de l'humidité relative à $\pm 1,2$ % HR, en tenant compte de l'ensemble de la chaîne de calibration et des conditions d'utilisation in situ.

— Fin du rapport —

Document interne — Weissgipfel-Institut — Distribution restreinte

© 2004 Weissgipfel-Institut. Tous droits réservés.

Projet artistique créé avec Claude Opus 4.6 (Anthropic, 2026). Les références bibliographiques citées sont des publications scientifiques réelles.