



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture



Autorité pour la Protection du Site
et l'Aménagement de la Région
d'Angkor / Siem Reap

Charte d'Angkor

*Orientations pour la sauvegarde
d'Angkor, site du patrimoine mondial*

Siem Reap, Cambodge
Le 5 décembre 2012

Siem Reap, Cambodge
Le 5 décembre 2012

Charte d'Angkor

*Orientations pour la sauvegarde
d'Angkor, site du patrimoine mondial*



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture



Autorité pour la Protection du Site
et l'Aménagement de la Région
d'Angkor / Siem Reap

table des matières

page

3.	Groupe de travail
6.	Avant-propos
8.	Aperçu historique du site d'Angkor
	ORIENTATIONS POUR LA SAUVEGARDE D'ANGKOR, SITE DU PATRIMOINE MONDIAL
15.	Partie 1: Principes
19.	Partie 2: Orientations
19.	I. Critères généraux
27.	II. Les impacts sur les struc- tures

31.	III. L'organisation du projet
41.	IV. Les caractéristiques des matériaux et la dégradation
52.	V. La conservation des matériaux
70.	VI. Le sol, l'eau et l'environnement
87.	VII. Le comportement de la structure et des désordres
96.	VIII. Les critères et les techniques de consolidation des structures
111.	IX. La carte des risques
116.	X. Remarques finales et remerciements de la part de l'APSARA et de l'UNESCO

Groupe de travail

Giorgio Croci (président)

UNESCO, expert

mail@giorgiocroci.com

Azedine Beschaouch

CIC-Angkor, secrétaire

azedinebeschaouch@hotmail.com

Anne Lemaistre

UNESCO, représentante

a.lemaistre@unesco.org

Mounir Bouchenaki

UNESCO, expert

mbo@iccrom.org

Pierre-André Lablaude

UNESCO, expert

lablaude@wanadoo.fr

Hiryuki Suzuki

UNESCO, expert

thsuzu5@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

Kenichiro Hidaka

UNESCO, expert

akadih@heritage.tsukuba.ac.jp

Simon Warrack

ICCROM

swarrack@gmail.com

Claude Jacques

EFEO

claud.jacques@sfr.fr

Pascal Royère

EFEO

pascal.royere@efeo.net

Christophe Pottier

EFEO

christophe.pottier@efeo.net

Chau Sun Kerya

APSARA

cskacacya@gmail.com

Ros Borath

APSARA

apsara.dma@bigpond.com.kh

Tan Boun Suy

APSARA

tanbounsuy@yahoo.com

Hang Peou

APSARA

hangpeou@yahoo.com

Takeshi Nakagawa

JASA

nakag@waseda.jp

Yoshinori Iwasaki

JASA

iwasaki@geor.or.jp

Ichita Shimoda

JASA

ichita731@hotmail.com

Sœur Sothy

JASA

ssoeru@yahoo.com

Hans Leisen

GACP

hans.leisen@fh-koeln.de

Esther von Plehwe-Leisen

GACP

jaeh.leisen@t-online.de

Thomas Warscheid

GACP

lbw.bb@gmx.de

Valter Maria Santoro

I.Ge.S

vm.santoro@igessnc.com

Glenn Boornazian

WMF

gboornazian@icr-icc.com

Janhwi Sharma

ASI

sharmasn.asi@gmail.com

D.S. Sood

ASI

ds_sood2006@yahoo.co.in

Hou Weidong

CSA

houweidong@263.net

Marie Françoise André

GEOLAB

m-francoise.andre@univ-bp-clermont.fr

Yoshiaki Ishizawa

Université de Sophia

yoshia-i@sophia.ac.jp

Roland Fletcher

Université de Sydney

roland.fletcher@sydney.edu.au

Michel Verrot

France-MoCC

michelverrot@gmail.com

*Le secrétariat a été assuré par
Lim Bun Hok
bureau de l'UNESCO à Phnom Penh
bh.lim@unesco.org*

RÉVISION DU TEXTE	PRODUIT	DATE
1ère révision	Projet	20 nov. 2002
2e révision	Projet	20 déc. 2002
3e révision	Projet	30 juin 2003
4e révision	Projet	24 sep. 2003
5e révision	Projet	13 fév. 2004
6e révision	Projet	14 déc. 2004
7e révision	Projet	22 déc. 2004
8e révision	Projet	1er mar. 2005
9e révision	Projet	15 jui. 2005
10e révision	Projet	30 nov. 2005
11e révision	Projet	31 mai 2006
12e révision	Projet	23 juin 2011
13e révision	Projet	29 fév. 2012
14e révision	Projet	07 sep. 2012
15e révision	Version finale	05 déc. 2012

Avant-propos

Tenant compte de la valeur universelle exceptionnelle d'Angkor, site du patrimoine mondial, ce document a été conçu pour aider les techniciens de terrain lors de la planification et de la mise en œuvre des interventions de sauvegarde de ses attributs précieux mais fragiles. Il se base sur une philosophie consensuelle tout en respectant la diversité et la spécificité de chaque situation.

Au cours des 20 dernières années, des rencontres et des débats ont eu lieu entre experts de terrain sur les complexités techniques de la sauvegarde du site d'Angkor. Ce document a pour but de présenter des opinions concordantes sur des questions fondamentales. Ces orientations faciliteront les choses aux professionnels du patrimoine dans leur planification et leur mise en œuvre d'interventions appropriées à la conservation et à la restauration.

Le document est en deux parties : la première partie (Principes) expose quelques principes fondamentaux de la conservation déjà établis sur le plan international dans de nombreuses chartes. Nous nous référons en particulier aux recommandations de l'ISCARSAH, comité scientifique international sur l'analyse et la restauration de structures du patrimoine architectural, qui est un comité technique du Conseil international sur les monuments et les sites (ICOMOS).

La deuxième partie (Orientations) se divise en plusieurs sous-chapitres qui, nourries par les débats approfondis, traitent des problèmes de documentation, du diagnostic et de l'évaluation des conditions de sécurité, de l'identification des matériaux utilisés lors de la construction des temples de la région d'Angkor et des techniques de construction associées. Puis viennent les causes de la dégradation et de l'altération des temples, les méthodes principales de recherche et d'évaluation, ainsi que les moyens d'enregistrement et d'archivage de ces informations.

Enfin sont présentés les critères et techniques recommandés pour la conservation des monuments khmers à Angkor. Le dernier chapitre aborde les problèmes liés à la protection des monuments et la carte des risques.

Aperçu historique du site d'Angkor

L'immense groupe archéologique d'Angkor et les sites environnants – de Rolûos et de Banteay Srei – sont situés au Cambodge, à 20 km environ au nord du Tonlé Sap (ou Grand Lac) et à un peu plus de 300 km au nord de Phnom Penh par la route. Cette région est occupée par l'homme depuis des millénaires. Il semble que les premiers monuments hindous (Prasat Ak Yum, Trapeang Phong) aient pu y apparaître au plus tard vers le début du VII^e siècle de notre ère. Peu après, un roi établissait sa capitale nommée Hariharâlaya autour de son palais, Prei Monti, et un premier temple, Bakong. C'est la capitale dont Jayavarman II s'est emparé à la fin du VIII^e siècle, avant de se faire consacrer en tant que cakravartin, « roi des rois », sur le Phnom Kulen en 802 et c'est là qu'il est mort vers 835. C'est son fils qui lui succédera sous le nom de Jayavarman III ; on ignore la date de sa mort.

Un de ses parents, Indravarman I^{er}, monte sur le trône suprême en 877. Il va « moderniser » Hariharâlaya en restaurant totalement le Bakong, le faisant notamment plaquer de grès, en réutilisant le temple de Preah Kô comme sanctuaire dédié aux anciens rois et en créant au nord le premier grand réservoir ou bārây, mesurant 3800 m de long sur 800 de large.

Son fils Yaçovarman I^{er} est le fondateur de la ville d'Angkor, sous le nom de Yaçodharapura, nom qui semble avoir perduré plusieurs siècles ; mais cette ville, ou

tout du moins le « temple d'État », a été déplacée à plusieurs reprises. La ville semble s'être rassemblée autour de la colline du Phnom Bakheng au sommet de laquelle le roi faisait ériger un grand temple pyramidal. En même temps, il faisait aménager le premier des deux vastes bārāy d'Angkor (7,5 km sur 1,8), le Yaçodharatataka ou bārāy oriental, au sud duquel il aménageait de grands āçrama, « ermitages », consacrés à chacune des grandes religions de son empire.

Ce roi est remplacé sur le trône successivement par deux de ses fils, Harshavarman Ier (910 - vers 920) et Ishanavarman II (vers 920 - vers 928). Le premier fit ériger la petite pyramide de Baksei Chamkrong à la mémoire de ses parents. Le Prasat Kravan fut également édifié sous son règne.

Le roi suivant, Jayavarman IV, régnait à Koh Ker lorsqu'il s'empara du trône suprême, sans doute par la force. Consacré en 928, il demeura dans sa capitale où lui ou ses ministres firent construire une quarantaine de temples, dont le prang, la plus haute pyramide du pays khmer. Il mourut en 940, mais l'héritier qu'il avait désigné dut bientôt laisser sa place à un de ses frères, Harshavarman II, qui ne régna que quelques années.

C'est ainsi que Rājendravarman, son cousin germain, monta sur le trône suprême en 944, en revenant à Angkor. Il installa cependant sa capitale au sud du bārāy oriental, autour de Prè Rup, son temple d'État, consacré en 962. Auparavant, il avait construit le Mébon oriental au

milieu du bārāy. Il mourut en 968, sans doute victime de quelque attentat. Cette même année avait vu la consécration des statues du temple de Banteay Srei, construit par son guru Yajñavarāha.

C'est le fils de Rājendravarman qui lui succéda, sous le nom de Jayavarman V. Son règne paraît avoir été calme. Il fit construire le temple de Ta Keo et son palais à l'ouest du grand bārāy. Il mourut en l'an 1000.

La période qui a suivi est plutôt confuse : Jayavarman V eut un premier successeur, éphémère, qui disparut en 1002 ou peu avant. Deux hommes se firent alors consacrer « roi des rois » dans la même année 1002, l'un et l'autre d'ascendance inconnue : Jayavīravarman s'établit à Angkor, continuant la construction de Ta Keo, tandis que Sūryavarman Ier commença à régner dans la région de Battambang. Ce fut la guerre, qui s'acheva au bout d'une dizaine d'années par la défaite de Jayavīravarman. Sūryavarman Ier, triomphant, s'installa à Angkor, mais fit entourer de solides murailles le domaine de son palais royal, qui deviendra la cité d'Angkor Thom. Outre son palais, cette enceinte enfermait un temple d'État relativement modeste, le Phimeanakas. Il régna jusque vers 1050, après avoir fait aménager l'immense bārāy occidental (8 km sur 2,2) ; il commença probablement l'édification du Bapûon, mais n'eut pas le temps de le terminer avant son décès.

Son fils Udayādityavarman Ier lui succéda. Il poursuivit la construction du Bapûon et édifia le Mébon occiden-

tal au milieu du bārāy. Cependant, il dut faire face à de violentes révoltes. Il mourut vers 1066, laissant un trône sans doute affaibli à son frère Harshavarman III, qui continua à lutter, sans grand succès, contre les révoltes.

Celui-ci disparaît en 1080, abandonnant le trône à Jayavarman VI, vraisemblablement son vainqueur. On sait peu de choses de l'origine de ce roi, sinon qu'il venait de Mahīdharapura, site que l'on ne sait où placer. Il régna jusqu'en 1107, mais on ne connaît pas de grande œuvre monumentale construite par lui. Sous son règne a été construit le temple de Pimay, aujourd'hui en Thaïlande. Son frère aîné Dharaṇīndravarman Ier lui succéda, mais il fut bientôt éliminé par un de ses petits-neveux, Sūryavarman II, en 1113. Celui-ci passera dans l'histoire comme le constructeur du chef-d'œuvre de l'art khmer, Angkor Vat. Il passa cependant une grande partie de son temps à guerroyer, notamment contre le Vietnam. Il disparaît vers 1145.

Suit une nouvelle période de troubles. On ne sait que peu de choses du roi qui monte alors sur le trône suprême, Yaçovarman II, qui périt vers 1165 dans une embuscade conduite par son successeur, Tribhuvanādityavarman, dont on ignore également à peu près tout.

En 1177, un roi cham vient avec une troupe khmère et s'empare d'Angkor : on peut supposer qu'il venait pour y installer l'un de ses amis khmers. C'est alors que le futur Jayavarman VII vient combattre l'ennemi cham (et khmer) et tenter de regrouper un pays khmer fort désin-

tégré, semble-t-il. Il ne parviendra à monter sur le trône qu'en 1182, sans avoir pu ramener un calme parfait. Ce fut un très grand organisateur, à qui l'on attribue en particulier un renouveau des hôpitaux. Bouddhiste convaincu, mais à l'esprit tout à fait tolérant, il fut un bâtisseur infatigable, à Angkor et dans les provinces, même s'il est peu vraisemblable qu'il ait construit tout ce qu'on lui a attribué. Citons en particulier, à Angkor, la ville et le temple de Ta Prohm, la ville et le temple de Preah Khan, accompagnés d'un bārāy et de Neak Pean, la cité d'Angkor Thom avec le Bayon et son palais royal.

Il est mort vers 1220, laissant son trône à un roi Indravarman II, dont on ne sait à peu près rien. Il semble pourtant certain que ce roi, bouddhiste convaincu lui aussi, a continué pendant son long règne l'œuvre edificatrice de Jayavarman VII, avec qui il n'est pas sûr qu'il ait été apparenté.

Il est remplacé en 1270 par le roi Jayavarman VIII, qui semble s'être attaché à effacer toute trace de la religion de ses prédécesseurs immédiats, provoquant une destruction systématique des figures du Bouddha qu'ils avaient profusément diffusées sur toute la région d'Angkor. En même temps, il veilla au renouveau des anciens monuments hindouistes, notamment Angkor Vat et le Bapûon. C'est à la fin de son règne que vint au Cambodge le diplomate chinois Chou Daguan, qui laissa un rapport très élogieux sur le Cambodge et ses richesses à l'époque. Jayavarman VIII abdiqua en 1298 en faveur de l'un de

ses gendres, Śrīndravarman, à l'esprit plus tolérant, favorisant l'essor des deux grandes religions.

Désormais, nos connaissances sur Angkor se bornent à peu de choses : on a encore les noms de deux rois, Śrīndrajayavarman et Jayavarman Parameśvara. On ignore en effet l'histoire politique d'Angkor après le XIII^e siècle, ce qui n'empêche pas d'admirer à Angkor des monuments de cette époque comme Preah Pithu et Preah Palilay.

Angkor a vécu par la suite dans la discrétion, petit royaume tranquille mais bien vivant, se réveillant quelque peu dans la seconde moitié du XVI^e siècle.

ORIENTATIONS
POUR LA SAUVEGARDE
D'ANGKOR, SITE
DU PATRIMOINE MONDIAL

Partie 1: Principes

- La conservation, la consolidation et la restauration du patrimoine architectural exigent une approche multidisciplinaire.
- La valeur et l'authenticité du patrimoine architectural ne peuvent pas être établies en se basant uniquement sur des critères stricts, car le respect de chaque culture exige une prise en compte du patrimoine physique au sein du contexte culturel auquel il appartient.
- La singularité des structures patrimoniales, associée à leurs histoires complexes, demande la mise en place d'études et d'analyses en suivant des étapes très proches de celles utilisées en médecine. L'anamnèse, le diagnostic, la thérapie et le suivi correspondent respectivement à l'état des lieux, à l'identification des causes des désordres et de la dégradation, au choix des remèdes et au contrôle de l'efficacité des interventions. Pour garantir à la fois le côté pécuniaire et éviter toute incidence trop importante sur le patrimoine architectural, il est souvent opportun de répéter toutes ces étapes de manière itérative.
- Une compréhension complète du comportement structurel et des caractéristiques des matériaux est indispensable lors de la mise en œuvre de tout projet de restauration et de conservation. Des recherches

sont nécessaires pour comprendre l'état d'origine et les états postérieurs des ouvrages, les techniques et méthodes utilisées lors de leur construction, les changements occasionnés et enfin leur état actuel.

- Avant toute prise de décision pour intervenir sur une structure, il est indispensable d'avoir défini les causes des désordres et de la dégradation, puis d'avoir évalué le niveau actuel de sécurité de l'ouvrage.
- La mise en place d'un programme d'entretien approprié de l'ouvrage permet de limiter ou de reporter une intervention nécessaire postérieure.
- Aucune intervention ne devrait être mise en œuvre sans avoir préalablement démontré sa nécessité.
- La formulation de toute intervention repose sur une compréhension détaillée du type d'action (les forces, les accélérations, les déformations, etc.) ou d'élément qui a entraîné des désordres ou des dégradations et qui risquent d'en entraîner à l'avenir.
- Le choix d'un parti de restauration utilisant des techniques traditionnelles ou innovantes doit être défini au cas par cas en privilégiant le parti le moins invasif et le plus compatible avec les valeurs patrimoniales, les exigences de sécurité et de pérennité, mais aussi avec les moyens à disposition pour l'entretien de l'ouvrage.

- Il peut arriver que les difficultés qu'il y a à évaluer le niveau de sécurité et les impacts positifs espérés des interventions exigent l'utilisation de méthodes d'observation, par exemple en suivant une approche progressive commençant avec un niveau minimum d'intervention, gardant ainsi la possibilité de prendre ultérieurement des mesures correctives.
- Il faut avoir établi la compatibilité des caractéristiques des matériaux utilisés pour les interventions de restauration (notamment les matériaux neufs) avec les matériaux existants. Leurs effets sur le long terme doivent être pris en compte pour prévenir tout effet secondaire indésirable.
- Les qualités distinctives de la structure et de son environnement lors de sa construction d'origine ainsi que tout changement postérieur significatif ne doivent pas être altérés.
- Chaque intervention doit autant que possible respecter l'architecture et les techniques de construction d'origine ainsi que la valeur historique de l'ouvrage et les traces de l'histoire dont il témoigne.
- Il faut privilégier une intervention réparatrice plutôt que de vouloir remplacer.
- Les imperfections et altérations devenues inhérentes à l'histoire de l'ouvrage doivent être entretenues tant qu'elles n'entravent pas les exigences de sécurité.

- Le démontage et remontage doivent être mis en œuvre seulement lorsque la nature des matériaux et de la structure l'exige et/ou dans le cas où la conservation, en utilisant d'autres moyens, est plus néfaste.
 - Il convient d'interdire des mesures qu'il est impossible de contrôler lors de leur application et dont l'efficacité n'est pas prouvée. Toute proposition d'intervention doit être accompagnée par un programme de suivi et de contrôle qui doit être conduit le plus largement possible pendant l'avancée des travaux.
 - Toutes les activités de contrôle et de suivi doivent être documentées et archivées, faisant partie de l'histoire de la structure.
 - Des recherches archéologiques préventives doivent être menées en amont des travaux de conservation prévus sur l'emprise du site d'Angkor. Un diagnostic par des tranchées systématiques et les fouilles préventives permettront en effet d'évaluer l'impact desdits travaux sur le patrimoine archéologique et monumental et de justifier, en cas de besoin, la mise en œuvre de mesures de sauvegarde, d'étude et de documentation.
-

Partie 2: Orientations

I. Critères généraux

Ces orientations ont pour objectif d'amener à une meilleure compréhension, et par là, à une amélioration de la conception et de la planification des interventions de conservation et de sauvegarde mises en œuvre dans les temples d'Angkor. Cependant, elles ne doivent jamais servir à remplacer des études et recherches scientifiques et culturelles approfondies que ces recommandations viennent compléter.

La conception structurelle générale des temples d'Angkor est simple et intelligente, mais l'interaction dont il faut tenir compte entre la dégradation avancée des matériaux et/ou les désordres structurels – résultats de l'action des différents agents de dégradation et détérioration – complique les projets de conservation et de restauration, comme nous le verrons dans les lignes qui suivent.

Des déformations importantes et des effondrements partiels sont fréquents. Ils posent des problèmes non seulement pour la conservation et la consolidation des monuments et leurs décors, mais aussi pour le démontage partiel et la reconstruction.

Il faut donc trouver un équilibre entre la mise en sécurité et la pérennité, tout en ne perdant pas la signification, l'authenticité et les traces de l'histoire du monument.

Les matériaux constitutifs subissent des altérations et des dégradations naturelles, si bien que leur conservation et celle des surfaces sculptées – une caractéristique des temples de la région d'Angkor – sont aussi importantes que la conservation structurelle.

Il est vital de comprendre non seulement l'état du monument en termes de statique et de préservation, mais aussi sa signification. Un monument peut avoir différentes significations selon différentes parties prenantes, et cela peut influencer sur l'approche technique adoptée pour la conservation du temple.

La relation entre les monuments d'Angkor et l'environnement reste complexe, car la forêt qui a envahi nombre d'entre eux pendant les nombreuses années d'abandon est maintenant considérée comme faisant partie du patrimoine naturel et culturel du site. Cela amène donc à employer des techniques et des technologies qui s'inscrivent dans le cadre d'une approche culturelle générale. Le problème est accentué par le couvert forestier et végétal qui peut avoir un impact négatif particulièrement important à l'encontre d'une structure. Cependant, on peut aussi noter que l'enlèvement du couvert forestier peut à son tour engendrer des désordres, car son absence peut entraîner des conséquences rapides et drastiques sur le microclimat et le niveau de la nappe phréatique. Ceci souligne l'importance d'un recensement écologique et forestier d'ensemble à Angkor.

Le site se caractérise par un environnement naturel prégnant qui doit être pris en compte non seulement lors du choix des techniques et des technologies à employer, mais aussi dans l'ensemble de l'approche culturelle. Il est indéniable que la végétation provoque des désordres et des dégradations ; cependant, ces arbres vénérables en milieu monumental constituent des éléments uniques et exceptionnels de la valeur culturelle du site qu'il faut préserver aussi longtemps que possible, même si cela doit amener à accepter des compromis avec l'intégrité des structures qui, en conséquence de l'action naturelle, devront peut-être être renforcées.

Il faut cependant rappeler que ces arbres ont un cycle de vie et lorsque leur mort inéluctable intervient, ils tomberont et représenteront alors un danger potentiel pour l'ouvrage. Il s'agit donc de mettre en place un système de suivi des arbres par des experts. Ils devraient être conservés le plus longtemps possible, accompagnés si nécessaire de mesures exceptionnelles, puis devront être abattus en cas de risques de chute imminente. L'établissement d'une carte des risques détaillée associée à un plan de suivi et d'entretien destiné aux experts en sylviculture et en conservation est une priorité immédiate.

La philosophie de la conservation et de la restauration n'a pas été une doctrine linéaire dans le temps, mais au contraire évolue sans cesse grâce aux enseignements tirés et aux avancées venant d'un nombre toujours croissant de disciplines associées, ainsi qu'à une réflexion plus approfondie sur les aspects culturels. Certaines disciplines

nouvelles sont devenues nécessaires, mais qui ne sont pas forcément directement liées aux activités de restauration et de conservation.

Les problèmes inhérents aux grandes interventions n'ont rien de nouveau. Autrefois, on avait souvent recours au béton armé lors de travaux de restauration. Or, l'approche est désormais différente. Dans ces cas de figure, il faut élaborer un projet cohérent compatible avec la philosophie de restauration alors adoptée.

Ces recommandations ont pour objectif de contribuer à une plus vive prise de conscience et à une meilleure compréhension des problèmes divers et de leurs solutions possibles. Elles ne sont pas des règlements rigides à respecter lors du choix des critères d'intervention, car ceux-ci correspondent à un contexte et à un environnement spécifiques. La conservation et une consolidation la moins invasive possible des structures doivent être les mots d'ordre. Des approches différentes, comme le démontage et le remontage et/ou la conservation du caractère romantique des ruines archéologiques, peuvent parfois présenter des alternatives tout à fait valables.

La conservation doit toujours être vue comme un processus interdisciplinaire où les experts de toutes les disciplines de la conservation jouent un rôle égal dans le processus de planification, de mise en œuvre et de suivi des activités.

En ce qui concerne la réversibilité, il convient d'établir une distinction entre les interventions structurelles, d'une part, et la conservation des matériaux, d'autre part. L'approche suivie dans le premier cas est en général la bonne ; dans le second, il est pratiquement toujours impossible de déclarer l'intervention terminée. Il faut donc prendre en compte la compatibilité et l'efficacité des matériaux. En outre, toutes les méthodes et tous les matériaux doivent être longuement testés en laboratoire et sur le site avant toute application lors d'une intervention de conservation.

La réversibilité d'une intervention est certes un critère de validation, mais n'est pas une règle absolue, tout d'abord parce qu'elle exclut des matériaux compatibles et fréquemment employés (des mortiers préparés à la chaux pour n'en citer qu'un exemple), et parce que la plupart des matériaux considérés comme étant réversibles lors des tests en laboratoire ne sont pratiquement jamais complètement réversibles lorsqu'ils sont mis en œuvre in situ (par exemple les résines organiques).

Le conservateur endosse entièrement la responsabilité de ses choix et doit donc être capable de prouver scientifiquement leur adéquation. Il faut documenter toutes les étapes amenant au choix des matériaux de conservation.

Une condition importante pour la conservation des matériaux à employer est leur compatibilité – chimique, phy-

sique et esthétique – par rapport aux matériaux d'origine, notamment dans le climat extrême de type tropical qui caractérise Angkor.

Ces dernières décennies ont vu la contribution importante de techniques, de technologies et de matériaux innovants. À l'heure actuelle, nous sommes en mesure de pouvoir effectuer une analyse critique de leur efficacité aux points de vue technique et culturel. Il est désormais convenu que dans certains cas, ils peuvent être un atout supplémentaire pour la sauvegarde des monuments par rapport aux techniques traditionnelles. Il apparaît donc clairement que tous types de méthodologies et de matériaux devraient être pris en compte et évalués de manière scientifique (et culturelle) avant leur application dans une intervention de conservation. En raison de l'échec de certaines techniques et matériaux modernes dans un passé récent, il est particulièrement important d'en étudier les effets positifs et négatifs.

Cette Charte pour Angkor se distingue d'autres documents similaires, car elle se réfère à des typologies structurales/architecturales précises et à des conditions environnementales spécifiques.

Ses principes généraux doivent donc être réinterprétés et suivis de manière souple toujours en relation avec les problèmes singuliers que pose le site d'Angkor. Une bonne conservation peut être réussie grâce à un bon équilibre entre le général et le particulier, l'universel et le spécifique, entre ce que tous les monuments ont en commun

et la spécificité de ceux d'Angkor et de leur environnement.

C'est le respect de l'authenticité des monuments qui guide les interventions, même si pour les monuments d'Angkor l'authenticité se présente sous plusieurs aspects. Nous devons respecter l'authenticité de la forme et de la géométrie, l'authenticité des matériaux, celle de la structure et de son comportement statique, l'authenticité de l'environnement du monument et l'authenticité de sa fonction et/ou de son usage.

Il arrive que ces différentes facettes de l'authenticité semblent se contredire, par exemple la conservation de l'environnement du monument donc des arbres qui ont poussé sur les temples et qui peuvent menacer la structure. Un autre exemple porte sur les matériaux perdus par suite d'altération météorique ou d'effondrement. Cela fait partie de l'histoire du monument tout en posant un problème majeur en ce qui concerne la géométrie, la forme originelle de l'ouvrage, et donc son authenticité culturelle.

La conservation et la restauration doivent autant que possible respecter toutes les composantes du concept global d'authenticité, mais lorsque l'on se retrouve face à des contradictions ou à des incompatibilités entre les différents aspects spécifiques évoqués plus haut, il est nécessaire d'arriver à un équilibre résultant de réflexions approfondies ayant pesé le pour et le contre de chacune des options envisageables.

Le parti de restauration arrêté devrait privilégier les aspects les plus significatifs du monument concerné au regard du contexte général du site.

Cela signifie que pour différents monuments présentant des problèmes similaires, différents partis de restauration peuvent être mis en œuvre. L'important, c'est de respecter l'esprit, plutôt qu'une lecture littérale des principes généraux, en basant les choix sur une réflexion rationnelle guidée par des comportements déontologiques, cohérents et universels.

II. Les impacts sur les structures

On trouve différents types d'impacts qui influent sur les matériaux et le comportement de la structure. Ces impacts peuvent être divisés en différents groupes définis comme suit :

a) Les impacts directs sur la statique:

Ils sont représentés par les forces engendrées par le poids des structures, les charges appliquées, notamment la présence d'humains, etc. En règle générale, le poids de la structure représente la charge la plus importante dans cette catégorie.

b) Les impacts indirects sur la statique:

Ces impacts ne sont pas, contrairement à la catégorie précédente, représentés par les forces mais par les déformations subies par la structure.

Les déformations peuvent être internes, par exemple les caractéristiques intrinsèques des matériaux (déformations causées par les changements de température, fluages et déformations visqueuses, etc.) ou externes, comme les mouvements subis par l'ouvrage suite aux mouvements des sols.

Ces déformations, si elles n'ont pas une certaine flexibilité, c'est-à-dire si la structure n'est pas isostatique, engendrent des forces et donc des poussées. C'est

notamment le cas pour les mouvements de sol (voir plus bas), qui peuvent devenir très forts. La température et le mouvement des sols exercent des impacts directs très importants sur la statique à Angkor.

Cette distinction est très importante car les critères d'intervention peuvent être très différents dans les cas a) et b).

c) Les impacts dynamiques

Ces impacts sont caractérisés par des accélérations qui engendrent des forces en relation avec les caractéristiques de la structure.

Les principales actions dynamiques sont le vent et les tremblements de terre. Le vent a certes une incidence sur l'altération de la température et l'humidité, mais il est aussi important d'évaluer l'effet dynamique du vent sur les matériaux et les monuments. En ce qui concerne les accélérations et donc les forces induites sur les structures, la taille massive et la rigidité des monuments empêchent habituellement la production des vibrations et toute incidence importante qu'elles peuvent engendrer, même si certains relevés sur les tours du Bayon tendent à indiquer l'inverse.

Quant aux tremblements de terre, les caractéristiques structurelles qui amplifient les effets dynamiques sont complètement différentes de celles dues à l'action du vent. Les masses en hauteur et les structures rigides sont les ouvrages les plus touchés, et

les temples d'Angkor affaiblis par leurs connexions structurelles peu habituelles ont pu en souffrir par le passé, et pourraient bien continuer de subir des désordres par suite de ces actions. L'analyse des désordres actuels n'exclut pas la possibilité d'une activité sismique.

Malheureusement, à l'heure actuelle, nous n'avons pas de données fiables sur l'intensité de tremblements de terre qui auraient pu avoir lieu, même si la géomorphologie du site semble montrer qu'il peut être sujet à de faibles secousses sismiques. Cependant, le quasi-abandon du site pendant des siècles ne permet pas de rassembler des informations pendant cette période. Des études et des recherches doivent être menées pour déterminer s'il y a lieu, dans les projets de conservation et de restauration, de prendre en compte l'activité sismique ainsi que son intensité.

Enfin, il est possible que des impacts dynamiques comme les vibrations engendrées par la présence d'humains, des véhicules et des avions puissent créer des désordres sur les ouvrages. Mais à l'heure actuelle, les avions ne semblent pas avoir un impact préoccupant.

d) Les impacts environnementaux:

Les impacts environnementaux incluent le climat (variations de température, précipitations), la pollution, la végétation, le tourisme, la montée des eaux,

etc. Ces impacts peuvent avoir des incidences sur les matériaux eux-mêmes (la pollution par exemple), sur le comportement structurel (les arbres) ou sur les deux (les variations de température qui peuvent engendrer des déformations et des problèmes structurels et en même temps favoriser la dégradation des matériaux). Il y a lieu de réfléchir aux changements microclimatiques qu'entraîne le dégagement d'arbres, car une telle mesure risque d'accélérer la dégradation de la pierre.

Les racines des arbres ont été une cause importante de dégradation et d'écroulement des structures dans le passé. Les racines qui pénètrent fréquemment et se développent dans les interstices entre les pierres engendrent des forces importantes qui déchaussent les blocs, changent la géométrie du temple et finissent par créer des situations instables. Des mesures préventives et de renforcement peuvent permettre aux arbres et aux structures de vivre en symbiose ; toutefois, il faut prévoir un plan d'entretien pour en vérifier régulièrement l'état des choses.

III. L'organisation du projet

III.1. Introduction

Le projet de conservation et/ou de restauration devrait inclure les activités suivantes, présentées ici de manière synthétique et décrites en détail dans les paragraphes qui suivent :

- **La planification** : elle comprend une première prise de contact, des visites préalables sur le site, la définition des buts et des objectifs, la définition du plan de travail, l'élaboration d'un budget et la répartition des tâches.
- **La documentation** : il s'agit de réunir toutes informations disponibles sur l'histoire de l'objet à conserver ou à restaurer, son iconographie, la construction, les interventions de conservation et restauration antérieures, une étude sur l'impact social et la préparation de plans et de fiches de documentation ; une documentation photographique, son suivi, l'état des lieux, une cartographie et la documentation des matériaux, les techniques de travail, une étude des matériaux et des agents responsables de la dégradation. Pendant cette phase, il faut aussi définir clairement le plan des investigations futures (l'anamnèse).

- **Le diagnostic et l'évaluation de la sécurité** : les causes des désordres et des dégradations et l'état actuel de sécurité doivent être pris au cas par cas et évalués en se basant sur les informations récoltées et sur l'analyse de la structure.
- **La thérapie** : les mesures doivent être prises individuellement et garantir la sécurité et la pérennité de l'ouvrage.
- **Les contrôles** : des contrôles de qualité doivent être effectués pendant et après les travaux de conservation/préservation, avec un calendrier d'entretien sur le long terme.

III.2. La planification

Avant le commencement de tout projet, il est nécessaire d'effectuer une évaluation préliminaire de la situation, des risques (et donc des priorités) et des informations et de procéder aux études nécessaires pour obtenir une première vue d'ensemble de l'ouvrage.

III.3. La documentation

III.3.1. La recherche historique

La première phase de l'étude doit toujours comporter une recherche historique des événements jalonnant l'histoire

du monument (y compris les reconstructions partielles ou complètes), ainsi que les techniques et méthodes employées dans la conception d'origine du monument. La consultation des archives à caractère historique est une phase essentielle de l'étude.

Cette phase de recherche et d'analyses est déterminante dans toute intervention de conservation. Tout programme de conservation doit être précédé de recherches approfondies avant le démarrage des travaux sur le site. Cette recherche doit s'étendre à tous les champs possibles, afin de fournir aux planificateurs et maîtres d'œuvres des interventions de conservation le maximum d'informations sur le site étudié. Ces recherches ne doivent pas se limiter à la simple conservation des matériaux et des structures, mais doivent aussi prendre en compte les facteurs historiques, sociaux, religieux, culturels et environnementaux.

Il faut notamment examiner avec soin la date de construction et d'inauguration de l'ouvrage, ainsi que les différentes époques historiques que le monument a traversées. Au Cambodge, comme ailleurs, un monument a pu passer par des périodes iconoclastes et des changements de religion, ainsi que des bouleversements sociaux/religieux.

Les documents originaux sont rares et peu de textes écrits sont disponibles sur ces thèmes. Les inscriptions sont fréquentes, mais peuvent mener à de fausses pistes notamment en ce qui concerne la date de construction

des temples. La recherche doit donc allier l'interprétation académique des inscriptions et des écrits à une observation attentive et une interprétation des surfaces architecturales, des matériaux constitutants et de restauration, ce qui peut souvent fournir des informations plus fiables. Il est important de souligner qu'un certain nombre de restaurations ont été effectuées au fil des siècles et que la datation des matériaux utilisés peut avoir une signification importante.

Les zones montrant des signes de modification ou de superposition doivent être étudiées attentivement. Lorsqu'il est nécessaire de faire des changements ou des ajouts pendant l'intervention de conservation/restauration, il faut les enregistrer et les expliquer, en y associant une documentation permettant d'identifier les différences entre les événements historiques et les travaux plus récents. Selon le contexte dans lequel l'objet est situé, les insertions, les retouches, les ajouts et le vieillissement artificiel doivent être minutieusement évalués.

III.3.2. Les relevés

Parmi les relevés, citons le relevé architectural et géométrique, le relevé de la structure (cartographie des désordres, fissures, déformations, faux aplomb, etc.) et le relevé des matériaux (les différents types de matériaux et les phénomènes de dégradation). Il est recommandé d'utiliser des techniques modernes.

III.3.3. Les fouilles archéologiques

Les recherches et les sondages archéologiques doivent constituer un volet indispensable de l'analyse des monuments d'Angkor et de leur évolution à travers les âges. Une connaissance de la stratigraphie du site est un élément important du processus d'identification de son état actuel et participe aussi pleinement au choix du parti de restauration et à l'élaboration du programme de conservation et de restauration.

Les données collectées lors de fouilles archéologiques devraient être rassemblées et partagées dans un site aussi vaste que celui d'Angkor puis être intégrées dans une base de données qui constituerait un document d'une valeur inestimable pour cet ensemble historique et permettrait de recouper les sources littéraires avec les données archéologiques.

Sur tous les sites où des études géotechniques ont été conduites, on a trouvé que le massif d'origine des monuments est fortement compacté. À Angkor, s'agissant de l'authenticité, les couches de sol très tassées qui forment le sous-sol artificiel représentent l'un des éléments qui définit le patrimoine qu'est la structure du sol, patrimoine qui ne doit pas être altéré lors de fouilles ultérieures. De plus, une fouille qui n'est que mollement remblayée risque facilement de s'éroder et d'entraîner un tassement du sol dommageable aux structures avois-

nantes, sans parler du danger que cela pose pour les visiteurs se rendant sur les sites. Le sol et les matériaux de remblai doivent ressembler le plus près possible au sol et aux matériaux d'origine. Il faut prévoir une documentation minutieuse de toutes les étapes intervenues dans ce processus.

III.3.4. Les tests et les investigations

Il est souvent nécessaire d'effectuer des essais sur les caractéristiques mécaniques (la résistance, etc.) et chimiques des matériaux.

III.3.5. La surveillance

Lorsque l'on observe des mouvements pouvant avoir un impact sur le comportement de la structure, il est nécessaire de suivre leur évolution. Ce type de contrôle se révèle nécessaire notamment sur des ouvrages reposant sur des massifs sédimentaires non stabilisés.

Le plus simple des suivis consiste à effectuer des contrôles topographiques périodiques et d'utiliser des marqueurs placés dans les fissures (en général des morceaux de verre qui se brisent lorsque la fissure évolue).

Un fil à plomb que l'on fait pendre pour mesurer le degré d'inclinaison peut se révéler être un outil simple et utile. Des systèmes de surveillance plus sophistiqués comme les

fissuromètres, les inclinomètres, etc. peuvent aussi être utilisés. Ils sont reliés à un enregistreur informatique. En raison de leur coût élevé, on utilise ces systèmes uniquement si cela se révèle vraiment nécessaire, par exemple lorsque l'évolution d'un phénomène risque d'engendrer des désordres importants ou un effondrement. L'analyse des diagrammes et des courbes des déformations analysées par ces systèmes de contrôle permettent en général d'identifier les risques avant qu'ils ne prennent trop d'ampleur et de prendre des mesures remédiatrices en temps utile.

La surveillance inclut les conditions climatiques à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment et parfois une analyse de la pollution atmosphérique.

III.4. Le diagnostic et l'évaluation des condi- tions de sécurité

Le diagnostic et l'évaluation des conditions de sécurité en découlant sont des phases fondamentales pour tout projet, puisqu'elles déterminent le parti des interventions à effectuer (la thérapie). Les résultats des trois démarches suivantes doivent généralement être pris en compte en parallèle :

- **La recherche historique** est une phase très importante pour la compréhension du monument qui participe donc pleinement au diagnostic et à l'évaluation de l'état du monument.

- **L'observation** de la structure, comprenant l'étude au cas par cas des types de fissures, des écartements des joints, des phénomènes d'écrasement, de détachement, de dévers, etc., est indispensable à la réflexion visant le diagnostic et l'évaluation des conditions de sécurité.
- **L'analyse structurelle** du bâtiment liée à ces problèmes spécifiques est la troisième étape menée conjointement avec la recherche historique et l'observation sur le site. Il est en règle générale suffisant de mener cette analyse sur la base d'un modèle simplifié de la structure.

Dans des cas plus complexes, des modèles mathématiques plus sophistiqués analysés à l'aide de logiciels informatiques devraient être utilisés. Il convient cependant de souligner que ces modèles mathématiques plus sophistiqués ne présentent pas forcément de résultats plus fiables que les modèles simples, en raison des difficultés à schématiser correctement des phénomènes complexes comme les effets des tassements de terrain. Ce qui compte, c'est l'interprétation correcte de la réalité complexe de l'ouvrage.

Un **compte rendu explicatif** doit clairement exposer les résultats de la phase de diagnostic et d'évaluation des conditions de sécurité en expliquant les causes de la dégradation des matériaux et des désordres structurels. Ce texte synthétise les points principaux analysés, notamment l'évaluation basée sur les trois démarches évoquées

plus haut : la recherche historique, l'état des lieux du monument et l'analyse structurelle avec des essais des matériaux. Il est important d'expliquer les choix et les décisions pris afin de justifier les interventions proposées.

III.5. La thérapie

Elle porte sur l'ensemble des mesures pouvant améliorer le comportement de la structure et la conservation des matériaux. Elle peut entraîner la modification des schémas de la structure et le remplacement de matériaux.

Choisir le bon type de thérapie dépend d'une part des considérations citées dans le chapitre 2 (interventions minimales, etc.) et d'autre part des résultats du diagnostic et de l'évaluation de la sécurité de l'ouvrage (se référer au paragraphe III.4).

Il y a en général plusieurs pistes à étudier et les choix se basent sur ce qui a été précédemment constaté en mettant en application les actions exposées sous les points II et III.4), en prenant en compte la pérennité, les coûts et la nécessité de prendre des mesures d'urgence.

Le type de thérapie arrêté doit aussi être clairement justifié en termes d'amélioration de la sécurité de l'ouvrage. Il est toujours indispensable de rassembler une documentation complète avec dessins et photographes illustrant l'état de l'ouvrage avant d'entreprendre quelque opération que ce soit, pour pouvoir vérifier toute modification.

III.6. Les contrôles et l'entretien

Les contrôles sont une série d'analyses et d'investigations (dont le suivi) vérifiant – pendant et après les travaux de conservation/restauration – si ceux-ci ont apporté les résultats attendus. Les contrôles doivent aussi figurer dans un plan général d'entretien de l'ouvrage, partie intégrante de tout projet de conservation et restauration. Ce plan établit un échéancier des différentes activités à mettre en œuvre dans des périodes de temps définies.

IV. Les caractéristiques des matériaux et la dégradation

IV.1. Introduction

Cette partie expose l'essentiel des caractéristiques des principaux matériaux utilisés pour la construction et les décors des temples d'Angkor. La dégradation de ceux-ci est liée à leurs propriétés et à leur exposition météorique. Les types de dégradation les plus courants affectant les matériaux de construction et de décors des ouvrages angkoriens sont brièvement exposés dans ce chapitre.

Comme cela a déjà été mentionné, les constructeurs khmers ont utilisé différents types de matériaux pour la construction des temples. En outre, on remarque que les conditions atmosphériques auxquelles ceux-ci sont soumis varient selon le site. Cela implique certaines difficultés à établir des orientations s'agissant des processus de dégradation, puisque celle-ci change selon les sites, les matériaux et, en général, résulte de l'interaction complexe entre divers phénomènes.

L'action de l'eau est commune à pratiquement tous les types de dégradation observés sur le site d'Angkor, donc avoir conscience de son impact sous toutes ses formes (précipitations, vapeur, condensation, capillarité, etc.) aide le conservateur dans de ses recherches sur les causes spécifiques de la dégradation.

Par conséquent, il est évidemment nécessaire d'étudier en détail le comportement du matériau constitutif en présence de l'eau, sa capacité à absorber celle-ci et sa porosité. Bien cerner l'interaction de l'eau avec les éléments des matériaux de construction est la clé pour comprendre les mécanismes de dégradation, actifs ou non.

Il est également indispensable d'effectuer des recherches et de se documenter sur le climat et le microclimat. Les variations fréquentes de température et d'humidité sont plus nocives pour les matériaux constitutifs que la température et l'humidité elles-mêmes. Il faut donc les relever à plusieurs emplacements du site pendant plus d'une année.

Là encore, cette charte est un texte d'introduction à l'intention des conservateurs et des chercheurs ; ces orientations ne doivent donc pas éclipser les analyses spécifiques toujours nécessaires dans la planification et la programmation des activités de conservation.

IV.2. Les matériaux de construction

IV.2.1. La brique

Les premiers ouvrages étaient pratiquement tous construits en brique. La brique est un matériau fabriqué par l'homme, une argile cuite. Les briques khmères sont cuites au four ; la température a pu varier selon leur em-

placement. Les briques ont un aspect rubané provenant des conditions de cuisson. Un cœur gris noir montre que l'atmosphère a été diminuée lors de la cuisson. Un manque d'homogénéité se retrouve dans les différentes propriétés des matériaux de la brique.

Selon le type d'argile utilisé et les conditions de cuisson, les briques trouvées dans le parc d'Angkor peuvent présenter de grandes variations de couleur : blanchâtre, jaune, rouge avec des nuances de gris pouvant même devenir noir. La brique absorbe l'eau de manière modérée voire moyenne, la résistance à la vapeur d'eau est faible et les propriétés mécaniques sont comparables à celles des nombreux grès rencontrés dans le parc d'Angkor.

Les briques ont été jointoyées de manière très serrée pendant l'assemblage. Il n'a été identifié qu'une très fine couche de liant entre chaque brique (cf. paragraphe VII.2). Il n'a pas encore été procédé à des études très poussées sur la composition de ce liant.

Les dégradations les plus classiques affectant les briques angkoriennes sont l'arrondissement des angles, le ponnage et l'éclatement. Elles portent souvent des traces de colonisation microbiologique.

IV.2.2. Le grès

Il est employé très largement dans la construction des temples khmers comme pour les décors et les sculptures. La plupart des grès utilisés dans la région d'Angkor ont

été certainement extraits des carrières situées au pied de la chaîne des Kulen et de celles à proximité de Bêng Mealea. C'est un grès en couches datant des périodes du jurassique moyen et du mésocrétacé. L'orientation des minéraux de mica montre la structure de la stratification. Par souci de simplification, le grès a été/ être classé en trois groupes principaux :

1. Le premier est constitué du grès vert marron ou jaune marron, le plus fréquent sur les temples d'Angkor. Il s'agit d'un arénite feldspathique provenant de carrières diverses. Il se pose principalement de quartz, de feldspath (feldspath plagioclase et alcalin) et de mica. Son grain est moyen voire fin, subangulaire et cohérent. Sa matrice est principalement argileuse et il a été parfois trouvé une présence plus importante de carbonates.
2. Le second est un grès rouge comme celui de Banteay Srei, un quartz-arénite. Il est composé principalement de quartz avec de petits fragments de roche présentant des grains détritiques arrondis et cohérents. Sa matrice est quartzitique. Sa couleur rouge est due à la présence d'hématite.
3. Le troisième grès est un grauwacke feldspathique verdâtre visible sur les parties supérieures du temple de Ta Keo, composé de quartz, de feldspath, de biotite de muscovite et de fragments de pierre.

Le type I présente une capillarité plus importante et moins de résistance que les deux autres types. La dégradation des différents types de grès varie énormément. Dans l'ensemble, c'est le grès vert marron et jaune marron qui est le plus sensible aux altérations météoriques, ceci est dû à sa composition minéralogique et à sa structure. Les types de dégradation principaux sont : la desquamation de ses formes, un émiettement et un écaillage par délitage et clivage.

Inversement, et là encore en raison de leur composition minéralogique, le grès rouge de Banteay Srei et le grauwaacke verdâtre de Ta Keo offrent une meilleure résistance. Le grès rouge développe des décolorations en surface de couleur noire, alors que le grauwaacke de Ta Keo forme des écailles fines. Ces deux types de grès tendent à se fragmenter.

La décoloration affecte tous les types de grès lorsque ceux-ci sont exposés aux conditions météoriques (noircissement du grès rouge, jaunissement du grès gris et blanchiment du grès vert).

L'environnement climatique des monuments joue un rôle important dans la dégradation des grès des temples d'Angkor. Une répétition de cycles d'exposition à la pluie et au soleil entraîne des mouvements de gonflement puis de rétrécissement, accélérant la dégradation des grès. L'humidité de l'air constante est plus favorable à la sauvegarde des matériaux constitutifs des ouvrages d'Angkor qu'un changement perpétuel des conditions climatiques.

Soulignons que le photo-monitorage du processus de dégradation des temples dont on a enlevé le couvert forestier montre que l'écaillage s'intensifie après l'abattage des arbres.

IV.2.3. La latérite

La latérite est beaucoup utilisée dans les fondations et sur certains murs d'enceinte. La latérite est une sédimentation résiduelle qui se développe dans le substrat rocheux dans les régions tropicales et humides. Des altérations météoriques intensives sur des terrains plats combinées à des températures élevées et à d'abondantes précipitations en saison des pluies favorisent la formation de ce type de pierre. La latérite ne se retrouve pas seulement sur les affleurements de la chaîne des Kulen ou dans le lit des rivières, mais il existe aussi des carrières dans de nombreux autres endroits. Lorsqu'elle vient d'être extraite, la latérite est légère et facile à tailler, ce qui en fait un matériau de construction très pratique. Cependant, son manque d'homogénéité ne permet pas d'y sculpter des décors aussi fins que ceux que l'on retrouve sur le grès.

On peut aussi classer ce matériau en deux catégories : la première concerne la latérite poreuse utilisée à Prasat Suor Prat et pour les fondations d'Angkor Vat. Les pores larges étaient à l'origine remplis avec de la kaolinite qui s'est érodée avec le temps.

La deuxième catégorie est la latérite pisolithique visible sur les assises inférieures du Ta Keo et sur le mur d'enceinte du Phnom Krom. Elle est relativement homogène par rapport à la latérite poreuse.

IV.2.4. Le bois

L'utilisation du bois à Angkor est omniprésente du VIII^e au XVII^e siècle. La plupart du temps il a été utilisé dans l'architecture des temples comme élément de décor, dans l'iconographie, ainsi que pour des outils d'usage quotidien. On retrouve des traces de portes, de piliers, de poutres et de plafonds de bois, ainsi que de nombreux trous de poteaux sur les terrasses bouddhiques (certains temples des Phnom Kulen, Preah Ko, Lolei, dans les portes d'Angkor Thom, Angkor Vat, Prasat Khleang Nord, Phimeanakas, Ta Prohm, Chrung et Top). Il a récemment été mis au jour un long bateau en bois datant du XIV^e siècle dans la zone de Vat Atvear.

Toute nouvelle découverte de vestiges de bois à Angkor devrait être sauvegardée dans un lieu approprié. Il y a lieu d'assurer un suivi régulier afin de vérifier l'état des bois encore présents dans les temples. Tous les projets de conservation et de restauration de la région d'Angkor doivent accorder un soin particulier aux anciennes structures en bois. Les types de bois utilisés pour les éléments de construction des temples, pour l'iconographie et comme objet d'utilisation quotidienne doivent être faire l'objet d'analyses scientifiques. Il serait souhaitable de construire un modèle en 3D d'un ancien ouvrage

historique en bois (le palais royal ou toute autre terrasse bouddhique de la période moyenne des Khmers) dans la zone d'Angkor afin de sensibiliser le public au patrimoine en bois et de donner aux structures en bois une place dans le patrimoine bâti.

IV.3. Les matériaux des décors

IV.3.1. Le stuc

Des sculptures en stuc recouvraient nombre de temples en brique. Ce matériau avait très certainement une fonction décorative et iconographique importante, mais pourrait aussi avoir servi à protéger la surface de la brique qui, une fois sculptée, était sujette à des dégradations.

La surface de la brique était souvent préparée au burin (Preah Kô) ou en perçant des trous (le Mébon oriental et certains des temples de Koh Ker) afin d'améliorer l'adhésion du stuc au substrat.

Le stuc contient de la chaux éteinte, du sable de rivière et des additifs organiques pour améliorer ses propriétés. Les grains de sable, principalement du quartz, ainsi que parfois des fragments de pierres sont de tailles et de formes différentes. La chaux était fabriquée de coquillages calcinés. Le stuc était appliqué alors qu'il était toujours en pâte puis moulé sur site. Il était appliqué en général en plusieurs étapes avec une couche préparatoire sur laquelle le motif était incisé ou dessiné avec du charbon

de bois, puis une couche de décor appliquée et enfin les détails les plus fins. La dégradation du stuc est principalement due au manque d'adhésion entre les différentes couches. La perte d'adhérence au substrat en brique ou entre les différentes couches entraîne un écaillage de grandes tranches des décors. Fissures et microfissures sont les types de dégradation habituels. En outre, il peut se produire une désagrégation granulaire due à la dégradation du matériau de liant et à la colonisation microbologique, entraînant un noircissement de la surface.

IV.3.2. Les peintures murales et les plâtres

Des traces de plâtre à l'intérieur et à l'extérieur des temples khmers sont toujours visibles. Il a été appliqué sur les murs en grès et en latérite. Les murs de grès dont la finition laissait à désirer ont été aplanis par de la chaux épaisse, alors que sur les murs en latérite du plâtre au limon a été retrouvé. Ces couches montrent parfois des restes de peintures.

Les murs en brique présentent encore des traces très fines de badigeons. Les temples en brique montrent souvent des traces de décors minutieusement exécutés. Des études récentes indiquent qu'il n'y avait pas que des traces de décors sur les parties externes des temples en brique des IX^e et X^e siècles, mais que les murs intérieurs avaient aussi été décorés de manière systématique.

Sont aussi visibles de nombreuses traces de peintures murales ou de décors polychromiques peints à l'origine sur des badigeons fins servant de couche préparatoire sur les murs. Les restes de peintures présentent des décors figuratifs ou fleuris et des motifs de décors sur des murs monochromes ou polychromes de couleur rouge ou ocre, parfois séparés horizontalement en zones par une bande noire. Les couleurs utilisées, toutes des pigments minéraux, sont le rouge, le noir, le blanc et le jaune. Les motifs peuvent être comparés au style des stucs et des décors en pierre extérieurs. L'état de conservation des peintures et des plâtres est critique ; il existe un risque très important, notamment à cause de l'action de l'homme (les visiteurs qui s'appuient sur les murs), de perdre les traces de ces décors.

Des toitures peu protectrices, l'impact néfaste des écoulements d'eau, sans oublier les impacts de l'action de l'homme, ont conduit à la dégradation de ces décors, si bien qu'une infime quantité est encore conservée. Les fortes pluies et la migration de sels leur font subir un stress élevé. Les types de dégradation principaux sont la perte de la couche de peinture, des efflorescences, la décoloration et la présence de tâches. On observe aussi le poudroisement et l'écaillage de la couche de peinture. La colonisation microbiologique est largement répandue.

IV.3.3. La polychromie

À chaque période de l'histoire architecturale khmère, il a été détecté des traces de peintures sur les surfaces. Ces

traces pourraient provenir de croquis qui permettaient de mieux exécuter un décor à motif de tapisserie ou pour de longues séquences de bas-reliefs, ou encore pour des décors polychromes sur différents supports. Parmi les pigments analysés, citons le rouge fer et l'ocre, le plomb blanc et rouge, le cinabre et l'or. Les spécimens de liant prélevés se composent de carbonate de calcium et d'un soupçon de substances organiques.

La peinture était directement enduite sur la surface du grès, de la brique ou du stuc ou après application d'une couche préparatoire.

Il a aussi été retrouvé des traces de laques sur les décors des murs et des sculptures. Une inscription à Angkor Vat indique que la laque a été appliquée sur les statues lors de restaurations post-angkoriennes. Des traces de dorures ont aussi été retrouvées sur les bas-reliefs d'Angkor Vat et sur les statues cultuelles les plus importantes. Ces dorures peuvent être des feuilles d'or posées lors de l'application de la couche finale pendant des travaux de restauration post-angkoriens ou bien des ex-voto posés par des pèlerins.

V. La conservation des matériaux

V.1. Introduction

En optant pour des méthodes spécialement adaptées à la préservation, on peut ralentir de manière considérable le processus de détérioration d'un monument. Les programmes de conservation et de restauration doivent prendre en compte toutes les contraintes individuelles de l'objet traité. Ils doivent être élaborés pour chaque monument et inclure un programmes d'entretien ultérieur. Il est cependant impossible d'arrêter complètement les processus de détérioration.

Toutes les interventions de conservation pratiquées sur les matériaux à Angkor doivent être précédées d'un relevé phénoménologique détaillé incluant une documentation et une analyse de tous les types de matériaux sur le site, leur répartition et leur état de conservation. Il faut se concentrer tout particulièrement sur les écailles creuses et sur les couches détachées. Il peut s'avérer opportun de pratiquer dans ces cas-là des interventions d'urgence.

La présence de sels nuisibles et le niveau d'humidité du chantier doivent être documentés. D'autres données d'importance sont : la formation de croûtes, la colonisation biologique et les mesures de conservation prises antérieurement (par exemple une intervention d'imperméabilisation). Des investigations non ou peu

destructrices permettront de confirmer les résultats des constatations visuelles. Il faut analyser la nature et le profil de profondeur des sels destructeurs. Une fois établis les propriétés matérielles, le type, le degré et les causes de la détérioration, il devient possible de planifier une bonne mise en œuvre des techniques et matériaux afin de mener à bien des travaux de conservation les plus adéquats.

La préparation des plans de préservation se base sur un système éprouvé évoqué au chapitre III. Une fois les premières visites effectuées et les discussions sur site menées, « l'anamnèse » commence. Toutes les données disponibles sur le monument, y compris l'historique de sa construction et de ses restaurations, doivent être rassemblées et étudiées.

L'analyse et le diagnostic complètent l'anamnèse. L'analyse inclut tous les volets concernant l'état et les matériaux de l'ouvrage. S'y ajoutent les investigations sur les problèmes de statique, les matériaux de construction et l'état de dégradation, mais aussi les conditions climatiques, géologiques et environnementales. L'état de l'ouvrage doit faire l'objet d'une documentation photographique exhaustive. Tous les éléments d'importance doivent être enregistrés et cartographiés. Ainsi, il faut enregistrer et décrire les problèmes liés à la statique et à l'utilisation des matériaux (types de pierre, plâtres, béton et polychromie), ainsi que les formes des désordres et la gravité de ceux-ci.

Une fois l'analyse terminée et les résultats évalués, l'élaboration du choix de la thérapie peut commencer.

En phase liminaire de la thérapie, il faut sélectionner des matériaux et des interventions appropriés. L'étape suivante consiste à organiser des tests en laboratoire et in situ. Les tests réussis sont alors inclus dans le plan de préservation et mis en œuvre. Une intervention complète doit être suivie par un contrôle de qualité et une évaluation. Un programme ultérieur de maintenance ou d'entretien du monument est absolument nécessaire.

Les tests menés en laboratoire et in situ constituent la seule façon de garantir la sécurité des méthodes de conservation et des matériaux. L'intervention de conservation ne doit jamais nuire aux matériaux à conserver ; elles ne doivent pas introduire de substances dangereuses pour l'objet ni changer les propriétés d'origine du matériau. Certains produits ont des effets secondaires négatifs dus à un manque de compatibilité ou à leurs actions sur le long terme et risquent finalement d'avoir des impacts destructeurs sur les matériaux traités. La possibilité d'un impact négatif de ces nouveaux produits doit être prise en compte.

Les mesures de conservation doivent être individualisées selon le matériau et selon chaque situation qui doit être étudiée en amont. Ces travaux doivent être mis en œuvre par des conservateurs compétents et spécialisés.

Les interventions de conservation doivent toujours être accompagnées d'un programme de contrôle de la qualité et d'entretien qui fait partie intégrante du geste de conservation. La mise en œuvre de mesures insuffisamment testées et non menées à leur terme risque de provoquer beaucoup plus de dégâts que les phénomènes de détérioration traités.

V.2. La planification systématique des interventions de conservation

Comme cela a déjà été dit, l'intervention de conservation exige une phase de préparation minutieuse comprenant une documentation complète et des recherches scientifiques. Les activités préliminaires comprennent une cartographie et une documentation détaillée des matériaux, de l'état de préservation de l'ouvrage et d'éventuelles interventions précédentes.

En se basant sur cette première évaluation, une carte des risques du monument est alors établie. Celle-ci estime le niveau de danger pesant sur les différents éléments, par exemple la pierre et les surfaces sculptées. Son rôle est essentiel lors de la première phase de planification et de mise en œuvre d'un programme de conservation efficace. Pour garantir une intervention de conservation sûre, il est de la plus haute importance de connaître très exactement les matériaux et leurs propriétés et l'état de conservation de l'ensemble.

En se basant sur la carte des risques, il peut être établi une carte des priorités. Cette carte des priorités met en relation l'estimation des dangers avec la valeur historique et l'importance des éléments individuels de l'ouvrage. Elle détermine la hiérarchie de la restauration des divers éléments (voir le chapitre IX).

Ces deux outils de planification – la carte des risques et la liste des priorités – permettent la mise en œuvre d'un projet de conservation systématique pour les monuments d'Angkor.

V.3. La consolidation préliminaire/d'urgence

La consolidation d'urgence ou préliminaire est une première phase essentielle et peut jouer un rôle déterminant pour le succès de l'ensemble de l'intervention. Elle peut être menée en même temps que chaque phase des interventions de conservation. Les interventions d'urgence permettent de garder à leur place des éléments en grand danger et d'éviter leur perte. Comme pour toutes les activités de conservation, elles doivent être planifiées et mises en œuvre de manière méticuleuse. Les interventions de conservation d'urgence doivent être entièrement réversibles, car une fois le programme global de conservation terminé la stabilisation d'urgence doit être enlevée. Les procédures de consolidation d'urgence ne doivent pas entraver le déroulement du programme de conservation ni être incohérent par rapport aux méth-

odes et aux matériaux. Seuls des matériaux non altérables sur le site peuvent être mis en œuvre.

V.4. Le nettoyage

Le nettoyage de la pierre est une procédure de conservation nécessaire dans les cas suivants :

- En présence de croûte de sels entraînant la détérioration.
- En présence de couches denses sur la surface de la pierre.
- Lorsque la lecture des reliefs et des éléments architectoniques est rendue très difficile.
- Lorsqu'il est impossible d'appliquer des méthodes et des matériaux essentiels pour la conservation.

Il est parfois nécessaire d'enlever les matériaux utilisés lors d'interventions précédentes et qui se sont révélés nuisibles, par exemple des réparations faites avec du ciment de Portland ou en béton armé et des enduits de résine acrylique.

En ce qui concerne les procédures de nettoyage de la pierre, chaque méthode doit être adaptée aux besoins de conservation des monuments d'Angkor. Le choix d'une méthode doit se baser sur un examen préliminaire de la situation sur le chantier. Avant d'entamer toute intervention de nettoyage, il faut s'assurer que la surface ne

présente aucune trace de couche polychromique ou de décoration murale. Car ces témoignages importants de la culture khmère risqueraient alors d'être détruits par la mise en œuvre du programme de nettoyage.

V.5. L'éradication des contaminations microbiologiques et le traitement biocide

Les attaques biologiques peuvent entraîner une dégradation des matériaux. Toutefois, il faut s'assurer avant toute entreprise d'éradication de faire la part entre l'action protectrice et l'action destructrice des agents biocides. C'est le cas spécifique des lichens ; en état de croissance active, ils peuvent induire la météorisation chimique des surfaces de pierre, mais leur action protectrice a été démontrée, car il s'établit une zone tampon sur la surface de la pierre, diminuant le choc thermique et l'impact direct de l'eau.

La situation géographique d'Angkor, une région sujette à la mousson tropicale, est propice à une activité microbiologique très importante. Les surfaces nettoyées sont recolonisées très rapidement. Dans ces conditions, il n'est pas possible de préconiser des biocides/produits chimiques, biologique ou non, capables d'inhiber efficacement la colonisation microbienne.

Des études microbiologiques effectuées par des équipes internationales œuvrant sur le temple d'Angkor Vat et d'autres temples du parc d'Angkor ont mis en lumière que la microflore sur les pierres se constitue d'une communauté microbienne complexe et stable d'algues, de champignons, de lichens et de bactéries dont la répartition est contrôlée par l'humidité ambiante.

Les biocides organiques et de chlorure devraient être évités en raison de leur toxicité, de leur absence d'efficacité sur le long terme et de leurs possibles effets nutritifs pour la microflore récurrente. L'application d'agents protecteurs de la pierre résistant aux microbiens doit être conforme aux standards internationaux de contrôle. Il faut en outre assurer une hygiène impeccable sur le site. Les activités de conservation doivent être complétées par la mise en place de mesures d'imperméabilisation. Là encore, l'efficacité des traitements de conservation sur le long terme doit être garantie par un entretien continu des monuments et des temples.

V.6. La réduction des sels

Les sels occupant les pores des minéraux constitutifs des matériaux de construction et de sculpture ont des origines diverses. La plupart des sels sont induits par l'impact environnemental ou biologique, notamment la pollution atmosphérique ou la colonisation par des animaux (chauves-souris, oiseaux, etc.). Qui plus est, le sel peut être produit par le matériau lui-même : La pierre,

la brique et le mortier, y compris le stuc, ont une teneur naturelle en sels. En outre, les matériaux utilisés lors de restaurations plus récentes comme le ciment de Portland ou divers types de chaux hydrauliques apportent aux matériaux une teneur en sel supplémentaire. Les différents sels minéraux, chacun à sa façon, attaquent et détériorent les matériaux.

La réduction des sels s'avère nécessaire à Angkor lorsque:

- Il y a présence de détériorations évidentes provenant d'efflorescences.
- Il est impossible d'appliquer des méthodes et des matériaux indispensables à la conservation.
- La pérennité de l'intervention de conservation est compromise par l'efflorescence.

La contamination par le sel doit être analysée sur la surface et en profil de profondeur ; les composants chimiques (anion et cation) et minéralogiques des sels doivent être déterminés. Il est possible de réduire des croûtes compactes de sel en utilisant des moyens mécaniques : la projection de microparticules ou l'utilisation de micro-burins ou burins à ultrasons. Il faut absolument mettre en œuvre une politique d'hygiène méticuleuse sur le chantier ; sinon, les sels qu'on a enlevés pénétreront de nouveau la zone traitée.

L'application répétée de cataplasmes de dessalement permet aussi de réduire les sels. Ces cataplasmes doivent

être adaptés à la taille des pores de la pierre, de la brique ou du mortier sur lesquels ils seront appliqués.

Les types de cataplasmes les plus communs et les plus efficaces sont des fibres de cellulose, des argiles absorbantes spéciales ou de la pulpe de papier. Les cataplasmes doivent être mélangés à de l'eau désionisée. En fonction des sels présents, leur réduction peut être effectuée soit en laissant les cataplasmes sécher, soit par l'application des cataplasmes que l'on humidifie en permanence. Cette réduction des sels par cataplasme s'accompagne toujours d'une utilisation abondante d'eau sur le matériel. Il faut prendre en compte ce facteur avant de décider ou non du choix de la méthode de réduction des sels. En raison des conditions climatiques régnant à Angkor, il faut éviter à tout prix une contamination biologique des cataplasmes.

V.7. La consolidation

L'altération météorique sur une longue période des ouvrages et des matériaux de décors peut entraîner une déstabilisation des zones extérieures. La consolidation de la pierre peut redonner de la résistance mécanique au matériau si l'altération météorique de la pierre a beaucoup affaibli les forces de cohésion des composants minéraux. L'étendue de la zone touchée dépend des propriétés des matériaux, de l'environnement, ainsi que des mécanismes et de la durée de l'altération.

La technique d'imprégnation avec des agents de consolidation adaptés à la résistance mécanique de la zone altérée peut être exploitée pour retrouver la résistance des matériaux non altérés. Il existe différents types d'agents de consolidation sur le marché. Autrefois, on utilisait des résines artificielles pour la consolidation, mais cela a provoqué des dégâts considérables. Ces agents sont désormais interdits à Angkor. Il est recommandé de s'assurer que le réactant de l'agent de consolidation est chimiquement semblable au matériel traité.

La consolidation par imprégnation d'agents de consolidation est mise en œuvre dans les monuments d'Angkor pour stabiliser les surfaces qui présentent des désagré-gations sableuses, des écaillages, ainsi que des zones friables sous des écailles creuses. On peut aussi renforcer les mortiers destinés au jointoiement, de façon à les rendre plus performants et plus résistants aux altérations météoriques tout en améliorant leur capacité d'adhésion au substrat.

La consolidation en utilisant la technique de l'imprégnation exige une planification minutieuse : la zone à conserver doit être protégée des précipitations ; les matériaux humides ne peuvent être imprégnés. Pour le site d'Angkor, il est donc indispensable de protéger des précipitations les zones à conserver avant le début de la saison des pluies. Inutile de dire qu'il faut aussi suivre le mode d'emploi du fabricant du produit de consolidation. Comme pour toutes les interventions de conservation, il y a une méthodologie à suivre pour mettre en œuvre une

conservation sûre et minimiser les risques de désordres que l'intervention pourrait engendrer.

Il est très important d'appréhender les profils de résistance et d'élasticité qui seront restaurés par le procédé de consolidation par imprégnation. Il est indispensable dans ce cas d'effectuer une transition homogène vers l'intérieur de la pierre, sinon une écaille disproportionnée solide en résulterait qui favoriserait un détachement plus important. Afin de réussir ce profil de résistance homogène, il est nécessaire d'effectuer auparavant des tests sur la zone et en laboratoire. Il faut d'abord déterminer la profondeur de la zone affaiblie, puis en laboratoire consolider un matériau équivalent afin de pouvoir sélectionner l'agent de consolidation, la quantité d'agent nécessaire, la durée du traitement et de confirmer que le profil de résistance est bien homogène.

V.8. L'injection d'écailles et le jointolement

Dans de nombreux monuments à Angkor le phénomène le plus répandu et dangereux pour le grès est la propagation de la desquamation aux contours. Celle-ci peut aussi affecter la brique. Des éléments plus en longueur comme les piédroits en grès présentent parfois des signes de délitage. Les couches des décors en stuc ont tendance à s'effeuiller et à se détacher du substrat en brique.

En injectant et en rattachant les écailles branlantes et les couches effeuillées, en utilisant un mortier spécialement conçu, les parties abîmées sont conservées, et on rétablit le transfert de l'eau sous forme liquide et de vapeur et celui de la chaleur. Les contours des écailles sont stabilisés, les trous et les joints sont remplis et réparés avec du mortier. Les bas-reliefs et les sculptures précieux peuvent ainsi être préservés.

Les mortiers à appliquer sont constitués d'agglomérants et de matières inertes. Pour préserver les grès d'Angkor, des mortiers à liant siliceux ont été mis au point, permettant une bonne compatibilité chimique. Préparés et appliqués par des conservateurs qualifiés, l'efficacité de ces mortiers a été prouvée.

Ces mortiers sont préparés avec des éléments de remplissage constitués d'agréats de pierre soigneusement gradués, de poussière, de sable lavé et d'autres matières de charge comme la silice sublimée. Ils sont préparés selon une distribution de la taille des grains précisément définie. Cette opération s'effectue en concassant de la pierre ou du sable extrait de la région, puis en séparant les grains selon leur taille à l'aide de tamis calibrés. Les méthodes de préparation doivent être modifiées en fonction des différents types de pierre utilisés sur chaque temple d'Angkor. Avant la mise en œuvre de l'intervention, il faut avoir établi une distribution correcte de la taille des grains et le mélange précis du liant-charge spécialement conçu pour les caractéristiques de chaque monument. Des liants minéraux comme la chaux ordinaire et la chaux

hydraulique ont été utilisés avec succès pour la conservation des ouvrages en brique et pour la préservation des éléments en stuc à Angkor. Toutefois, la recherche continue.

Il faut prévoir une cure par humidification de la plupart des mortiers de restauration afin que la réaction soit complète. Dans tous les cas, les conservateurs doivent suivre attentivement la méthode de préparation indiquée pour l'intervention, tout en observant les recommandations techniques du fabricant.

Les propriétés des mortiers de restauration doivent être spécialement adaptées aux paramètres du substrat et à son état de dégradation. Surtout, les propriétés mécaniques, notamment le coefficient élastique de Young et la résistance à la compression, doivent être inférieures à celles du substrat d'origine afin d'éviter toute dégradation provoquée par le mortier de restauration.

V.9. L'imperméabilisation

Il existe différentes options pour protéger contre la pluie les matériaux constitutifs et de décors des ouvrages : ériger un abri de protection, réparer une toiture existante, installer une couverture en tôle, etc., ou bien imprégner le matériau avec un agent hydrofuge. Il est recommandé de toujours privilégier les premières options.

Les traitements hydrofuges ont pour objectif de diminuer

l'absorption d'eau sans incidence sur le comportement de diffusion de la vapeur d'eau des matériaux. Il faut savoir que ce traitement empêche seulement la capillarité et qu'il n'atténue pas la contamination par des sels ou le gonflement hygrique. De nos jours, les hydrofuges les plus répandus sont fabriqués à partir de différentes préparations à base de silicone.

Un traitement hydrofuge ne doit être considéré que lorsque l'on est en présence de détériorations importantes causées par les précipitations et que la pierre a démontré une capillarité suffisante. Ces traitements ne sont pas efficaces sur le long terme. L'imprégnation doit être répétée à quelques années d'intervalle, avec un risque considérable de changer les propriétés des matériaux traités. Avant de choisir le parti d'un traitement hydrofuge, plusieurs conditions préalables sont obligatoires s'agissant des matériaux de construction :

- Absence de dilatation ou de gonflement des éléments, p. ex. des minéraux argileux.
- Absence de surfaces denses dues à la présence de stillolite, de sels, de croûtes ou d'une bio-colonisation intensive.
- Absence de sels hygroscopiques.
- Aucune contre-indication en raison d'une intervention de conservation antérieure ou de la présence de décors.

La plupart des matériaux en pierre à Angkor contiennent des minéraux argileux susceptibles de gonflement, ce qui

entraîne un risque important de détérioration ultérieure une fois le traitement hydrofuge appliqué. De nombreuses surfaces sont denses à cause des impacts de diverses dégradations et à la présence de décors. Le sel est omniprésent dans les matériaux de construction et de décors de tous les temples d'Angkor.

En raison des méthodes de construction des temples khmers, utilisant des joints à sec sans mortier, assemblant des fausses voûtes et des fondations basses, la pénétration par l'eau est omniprésente et incontrôlée. En outre, la situation des temples favorise les remontées capillaires qui sont très fréquentes. Une population nombreuse de chauves-souris produit des guanos chargés de sel qui entraînent une forte contamination en sels solubles des structures qu'ils habitent.

En règle générale, les temples khmers ne remplissent pas les conditions permettant l'application en toute sûreté d'un traitement hydrofuge, traitement qui risque d'être plus destructeur que protecteur.

V.10. Le nettoyage et les enduits sacrificiels

Il faut parfois lisser les surfaces endommagées et rugueuses afin de diminuer la zone de surface réactive des matériaux. Cela peut nécessiter l'application de badigeons assez dilués spécialement préparés. Les badigeons sont des revêtements de mortier très minces (environ 5

mm) qui protègent et parfois aussi renforcent la surface de la pierre altérée météoriquement. Ils ne cachent en rien l'aspect visuel du substrat de la pierre sous-jacent. Dans les monuments d'Angkor, les badigeons servent à stabiliser les écaillages et les surfaces sableuses et à atténuer les agressions climatiques en diminuant la surface de réaction. Ils sont normalement enduits lors de la dernière phase de l'intervention de conservation afin de protéger et d'égaliser les propriétés de la surface. La brique et le stuc peuvent aussi être protégés par un badigeonnage.

V.11. Le contrôle de la qualité et les programmes d'entretien

Il est nécessaire de mener une gestion qualitative des interventions de conservation. L'efficacité des méthodes et des matériaux utilisés doit être vérifiée avant, pendant et après l'intervention. Une fois la campagne terminée, la pertinence des activités de conservation doit être analysée et si nécessaire, elles seront à répéter, voire à recommencer. Il existe plusieurs moyens non ou peu destructifs pour évaluer les résultats obtenus (par exemple mesurer le niveau d'absorption de l'eau à l'aide de tests à la pipe de Karsten, des tests de vitesse des ultrasons ou des mesures de la résistance au forage). Un échéancier des actions de suivi est indispensable afin de vérifier sur le long terme la durabilité des mesures prises.

L'entretien est un volet essentiel des actions de sauvegarde et de protection des sites archéologiques. S'agissant des monuments d'Angkor, l'entretien peut prendre les formes suivantes : suivre la croissance des arbres et de leurs racines, débroussailler les structures, dépoussiérer, enlever les saletés et les nids d'insectes des murs, mettre en sécurité des parties présentant des risques comme des écailles, réparer les joints ouverts où il y a une infiltration d'eau et effectuer systématiquement des réparations de moindre ampleur. Toutes ces activités d'entretien doivent être menées avec le plus grand soin afin de ne pas engendrer de nouveaux désordres. Afin d'en assurer l'efficacité, ce programme d'entretien doit être organisé suivant un calendrier précis indiquant les différents types de contrôles et d'activités à effectuer à des intervalles différents.

VI. Le sol, l'eau et l'environnement

VI.1. Les conditions climatiques

Le climat de la région d'Angkor, située en Asie du Sud-Est, est de type sous-tropical avec une saison des pluies dont les effets sont exacerbés par le changement climatique. Les vents dominants sont du sud-ouest en été, apportant de l'eau évaporée de l'océan Indien. La mousson commence en mai et finit fin octobre avec une précipitation moyenne de 200 mm/mois.

La saison sèche va de novembre à avril, les précipitations se situant à 50 mm/mois et les vents dominants venant du nord-est, de la Chine. Vers la fin de la saison sèche, les températures augmentent, atteignant les 40 °C.

Les cycles quotidiens de température et d'humidité exercent des contraintes mécaniques sur les matériaux en grès et provoquent des dégradations importantes.

Pour de multiples raisons, le vent peut participer à l'action de la dégradation de la pierre et des maçonneries à Angkor.

VI.2. Le couvert végétal

La végétation à Angkor est principalement constituée d'une forêt semi-sempervirente qui fait partie in-

tégrante du patrimoine culturel des lieux. Si des arbres individuels peuvent menacer la stabilité des structures archéologiques, la forêt dans son ensemble joue un rôle protecteur. Tout d'abord en créant des conditions micro-climatiques et d'évacuation des eaux permettant la stabilisation des sols et la conservation de la pierre. Ensuite en permettant la croissance de biofilms de lichens sous lesquels le cycle de biodégradation s'effectue beaucoup plus lentement et plus superficiellement que sur les surfaces des pierres directement exposées aux rayons du soleil et aux pluies de mousson, par ailleurs sujettes à des dégradations mécaniques inorganiques majeures. Ce rôle de tampon du couvert forestier et du lichen doit être pris en compte et l'enlèvement de celui-ci ménagé afin de favoriser la préservation des surfaces en grès décorées ou du moins d'en retarder la dégradation.

VI.3. Le système hydraulique

Ce système joue un rôle majeur dans l'équilibre environnemental. L'aménagement de constructions hydrauliques a permis en effet l'essor de la civilisation angkorienne, grâce notamment à une exploitation raisonnée des fortes précipitations. La construction de berges, de réservoirs, de digues, de barrages et de canaux à vannes, souvent autour des ouvrages religieux, a permis des récoltes abondantes et a réduit les périmètres inondés.

Une bonne gestion de la ressource en eau n'a pas seulement fait prospérer les activités des Khmers, mais leur a aussi permis de contrôler les comportements des con-

structions dans les zones soumises au tassement des sols dû aux variations du niveau phréatique. Les réservoirs tels que les barays et les srah ont contribué à la régulation de la nappe phréatique et, par conséquent, à atténuer les déformations des fondations des constructions. Après le déclin de l'empire angkorien, l'absence d'entretien des infrastructures hydrauliques a entraîné leur évasement, mettant donc fin à leur action régulatrice sur les inondations saisonnières. C'est ainsi que des variations importantes du niveau de la nappe phréatique ont causé des désordres conséquents sur les structures et leurs fondations, ont déstabilisé les digues et accéléré la dégradation des matériaux.

VI.4. Le sol

Le sol de surface à Angkor est principalement composé de dépôts d'alluvions constitués de couches de sable fin et de sable argileux et limoneux ou de limons sableux. On relève aussi souvent la présence de limon provenant de l'érosion des sols et de son transport. Le contenu en eau varie de 12 à 25 %.

Le sol des surfaces supérieures est daté des dépôts quaternaires et fait environ 40 m d'épaisseur. On trouve ensuite du sable et du tuf de l'ère cénozoïque, ayant subi une altération météorique. La roche de base est constituée de pierre volcanique et/ou de grès du Jurassique (mésozoïque) à des profondeurs d'environ 70 à 80 m de la surface.

Les résultats de la reconnaissance du sol proviennent principalement des recherches géologiques et géotechniques effectuées par la JSA (Japanese Organisation for the Safeguarding of Angkor, les rapports annuels de la JSA, 1996 et suivants). On raisonne par similarité pour les autres sites de la zone, ce qui permet d'utiliser ces informations avant de commencer une campagne de reconnaissance plus complète sur toute la région d'Angkor.

Le sol sur lequel reposent les fondations des temples joue un rôle clé dans le comportement structurel et les types de désordres les plus courants.

Les oscillations de la nappe phréatique sont normalement influencées par le niveau de l'eau des rivières, lacs, digues et/ou réservoirs environnants et la variation de leurs niveaux, qui parfois peut atteindre plusieurs mètres entre la saison sèche et la saison des pluies. Cela engendre, en général, un tassement des sols selon leur contenu silteux et leur compressibilité.

VI.5. Le sol et l'eau

Angkor est situé entre la chaîne des Kulen, à environ 40 km au nord, et les plaines du lac Tonlé Sap au sud, sur les rives duquel se trouvent les temples le plus méridionaux. Les eaux prennent leur source de la chaîne des Kulen et coulent à travers ce bassin versant peu incliné, suivant des cours d'eau en surface et des canaux en souterrain en fonction de la perméabilité des sols et du principe de

la filtration. La nappe phréatique réagit immédiatement en surface aux précipitations, mais peu dans ses couches inférieures. La perméabilité du sol est d'environ 10 cm³/sec. La pente moyenne du sol est de 1/1000. La vitesse de l'eau souterraine est très faible : 31 m/an.

En raison de ce faible débit naturel, la fluctuation annuelle de l'eau de surface dans le sol est due aux infiltrations et à l'évaporation.

Au cours de la saison sèche, le niveau de la nappe phréatique descend de 3 m, voire jusqu'à 5 m de la surface du sol avant le retour de la saison des pluies. Autrement dit, en saison sèche, la couche superficielle du sol de 3 à 5 m d'épaisseur se dessèche et durcit.

Le sol se contracte en saison sèche et gonfle en saison des pluies. Ce changement de volume est un des mécanismes importants provoquant la déformation des structures en maçonnerie. On a pu observer un tassement et un soulèvement de 3 à 6 mm de la surface du sol dû au gonflement en saison des pluies et à la contraction en saison sèche lorsque le niveau d'eau souterraine varie d'environ 3 m.

La montée du niveau de l'eau dans les fosses et les tranchées risque d'entraîner l'écroulement soudain des berges, surtout dans la saison humide, lorsque des pluies fortes et longues sont fréquentes.

La montée du niveau des eaux en sol sablonneux entraîne une poussée générale plus importante et diminue les frottements mutuels des forces entre les grains, car ces forces dépendent des poussées effectives. Des éboulements de terrain soudains et des instabilités locales peuvent être provoqués par un ruissellement de l'eau de haut en bas, aggravés par des conditions de drainage insuffisantes. Ces circonstances peuvent entraîner un processus d'enchaînement qui commence par l'écroulement partiel au pied de la pente submergée par l'eau qui a atteint son taux de saturation.

Les bassins et les douves autour des temples jouent un rôle important dans leur architecture. Les bassins sont entourés de berges en terre fréquemment parementées de gradins en pierre pour accéder à l'eau. Le comportement de ces berges a souvent provoqué le déplacement des parties des temples à proximité. Des variations soudaines du niveau d'eau dans les douves, la plupart du temps dues à de fortes précipitations, peuvent engendrer un phénomène d'instabilité sur la berge en raison d'une faible perméabilité et d'un drainage inadéquat dans le massif de terre. Il faut donc observer la pression de l'eau interstitielle dans le sol résultant de la variation rapide du niveau d'eau dans le réservoir afin de mieux évaluer la marge de sécurité des structures en terre.

De nombreux exemples de ces phénomènes ont été relevés dans la zone d'Angkor, surtout dans les réservoirs dont le pourtour est parementé de gradins (la douve d'Angkor Vat, le Srah Srang, etc.).

L'écoulement des remblais de la berge des douves est fréquent à Angkor. Une des causes possibles, c'est le phénomène de renard qui progresse sur la face de la berge. Si la vélocité d'infiltration de la surface en aval dépasse un certain taux, le sol s'érode. Cela déclenche le phénomène de renard, soit l'érosion des sols internes qui finit par la formation d'un trou de l'aval vers l'amont. Derrière les pierres supérieures de la terrasse, des cavités peuvent se former par suite de cet écoulement d'eau et la mise en mouvement du sol.

VI.6. L'urbanisation et les infrastructures

L'action de l'homme, par la construction de canaux et de réservoirs, dès l'installation des premières cités royales khmères, a altéré l'équilibre hydrogéologique de cette zone. Ces dernières années, l'urbanisation rapide de la ville de Siem Reap, autrefois une agglomération peu importante, a introduit de nouvelles variantes ayant des incidences sur l'équilibre général de la nappe phréatique, car la population de la ville a augmenté beaucoup plus rapidement que les infrastructures nécessaires, avec un volume important d'eau naturelle pompée du sol.

Le tassement différentiel du sol est la cause principale des désordres subis par les structures en maçonnerie. Le pompage de la nappe phréatique par les hôtels a provoqué un rabattement considérable du niveau de l'eau souterraine. Il faut mettre en place un système de mesure du

niveau de l'eau souterraine à proximité des monuments et organiser et contrôler les puits sur Angkor afin de réduire les impacts négatifs sur les monuments causés par l'oscillation du niveau de la nappe phréatique.

Les fluctuations annuelles de la nappe phréatique, soit son changement saisonnier, sont la principale cause d'inquiétude, mais des évolutions importantes sur une longue période peuvent aussi avoir un impact sur le comportement des sols, par exemple en cas de sécheresse prolongée ou de modifications artificielles de l'indice d'hydratation des sols. Des déformations peuvent se développer de 10 à 30 ans après le déclenchement des variations, en fonction des propriétés du sol affecté, des conditions locales et des stratifications des couches.

VI.7. Le tassement des sols provoqué par les charges

Puisque la nappe phréatique reste peu profonde toute l'année, une partie de la déformation des sols peut être liée au poids direct des constructions en superposition, en raison du faible niveau de contrainte effective. Pour les couches de sol situées directement sous la construction, le volume de sol soutenant la charge externe imposée augmente en profondeur et les pressions liées baissent en conséquence, alors que la pression lithostatique augmente.

Utilisé comme simple mesure de référence, l'impact de la charge externe peut être considéré comme important dans des profondeurs correspondant à la taille de l'emprise de la construction. Lorsque l'on se trouve en présence d'un temple-montagne, cette valeur peut atteindre un chiffre considérable.

Les déformations uniformes ne causent généralement pas de désordres sur une structure lorsqu'elles se produisent sur l'axe vertical avec une translation rigide n'affectant ni son intégrité générale ni son équilibre. Cependant, les déformations sont rarement uniformes, en raison de l'irrégularité des dépôts et des stratifications des sols ainsi que de la répartition inégale des contraintes. En vérité, la théorie de la répartition des charges sur une surface de contact limitée engendre des tensions inégales même sur des sols homogènes.

Pour les couches plus profondes par rapport à la longueur de référence mentionnée, la charge permanente des sols l'emporte sur les autres facteurs.

VI.8. L'affaissement

La réduction du volume du sol sans changement significatif de la charge, soit l'affaissement, est un phénomène fréquent à Angkor et concerne les sols à grains fins et moyens. Ce phénomène d'affaissement se régule par le contenu initial en eau et la densité des sols, la perméabilité et les conditions aux limites ou compressibilité. Il

consiste en un processus lent expulsant l'eau de la matrice des particules des sols fins amenant des variations structurelles du sol interne.

Comme pour tout autre affaissement lié à l'action de l'eau, les déformations dues au tassement sont généralement irréversibles. De tels phénomènes pris de manière rationnelle peuvent être traités. Des puits ou des tranchées de drainage stratégiquement disposés et nettoyés peuvent contrer des déformations guère favorables ou avantager certaines plus positives.

VI.9. Les désordres et la rupture progressive

Des risques importants d'écroulement viennent de la diminution de la puissance de la friction interne du sol. En raison de la loi constitutive des sols, ici concernant des sols denses et rigides, des phénomènes de défaillance progressive sont constatés, caractérisés par des déplacements importants entraînant l'effondrement complet des structures en terre comme les pentes naturelles ou les tranchées artificielles.

Même après des déplacements importants, les masses des sols peuvent trouver un nouvel équilibre. Des charges plus importantes induisent des mouvements, ce qui est en général le cas lors du gonflement des sols de fondation. La tolérance de la structure aux déplacements peut compromettre l'usage/le fonctionnement de l'ouvrage,

mais pas sa capacité portante. Un tassement différencié des fondations peut engendrer deux phénomènes principaux :

- Une inclinaison lorsque la tour est assez raide ou lorsque les différents tassements des fondations sont linéaires.
- Des fissures verticales, en général accompagnées de déformations vers l'extérieur des murs et de glissements entre les blocs de pierre (ou les briques) lorsque les tassements différenciés ne sont pas linéaires. Se référer au paragraphe VII.6 pour plus d'informations.

VI.10. L'érosion souterraine (phénomène de renard)

Les percolations sont étroitement liées au phénomène précédemment traité de défaillance progressive, se produisant sur des sols fins, après l'apparition d'une charge hydraulique dont la valeur dépend de la perméabilité et de la direction du débit. Elle peut provoquer le soulèvement d'une partie du sol soumis à un inverse de pression par le débit de l'eau.

L'apparition d'une charge hydraulique devrait être évitée en utilisant un drainage indirect ou devrait être contrée par des forces de frottement adéquates. Une charge hydraulique peut entraîner l'effondrement soudain des structures.

En général, une eau qui s'infiltre d'un sol sableux à des couches limoneuses fines provoque une surcharge de la pression de l'eau, car la vélocité de filtration différente des sols concentre les pressions à l'arrière de la couche « moins perméable » plus rapidement que prévu.

La percolation d'eau de pluie dans les niveaux de sols plus profonds devrait être évitée dans les cas où les surpressions neutres liées à l'eau risquent de provoquer de tels problèmes. La construction de tranchées peut capter les eaux de ruissellement superficielles et la création de pentes douces doit être aussi encouragée.

VI.11. L'érosion

L'érosion de la surface des sols, due à l'écoulement de l'eau lors de fortes précipitations ne pose pas de problème sur le court terme, puisque la végétation en surface constitue une protection naturelle même lors des pluies de mousson.

En revanche, l'érosion par ruissellement du remblai d'une structure de soutènement provoque une diminution constante et progressive de son volume. L'intégrité de la construction peut être menacée à la longue par la perte de son remblai. Le processus est continu et localisé et finit par engendrer une répartition inégale des contraintes au contact de la force. Le phénomène de la raréfaction du volume de fondation peut être confondu avec le tassement des sols.

C'est un problème grave et fréquent à Angkor qui doit être résolu en filtrant les eaux drainées pour empêcher qu'elles transportent des solides venant de l'intérieur de la structure et/ou en installant une couverture appropriée pour empêcher les infiltrations.

VI.12. Les structures en terre et les berges

Il est nécessaire de porter une attention toute particulière aux structures en terre qui jouaient jadis un rôle primordial dans la civilisation angkorienne axée sur l'eau. Selon les types de constructions hydrauliques, les structures en terre étaient construites en sable, en sable limoneux et même en limon sableux ayant généralement une faible plasticité. La spécificité de ces structures est leur sensibilité aux variations de la pression interstitielle du sol en saison des pluies et selon le niveau d'eau dans le réservoir retenue par la digue.

Selon l'excédent de pression interstitielle par rapport niveau extérieur de l'eau, les forces non équilibrées peuvent provoquer l'effondrement du sol, ce qui peut entraîner une déformation plus ou moins importante, voire l'écroulement complet de la structure. Les remblais qu'ont posés les constructeurs khmers derrière les structures de soutènement, comme on le constate à Angkor Vat, présentent des couches argileuses horizontales servant de lit de drainage pour les eaux de percolation. L'eau ne pouvant passer à travers la structure en terre, ce mé-

canisme pourrait être incriminé en cas d'écroulement de la structure.

VI.13. Le drainage

Les différents systèmes de drainage des monuments d'Angkor ont pour objectif d'évacuer l'eau de l'intérieur des monuments vers l'extérieur, mais dans certains temples les drainages n'avaient pour but que d'évacuer les eaux sacrées utilisées pour les cérémonies religieuses. On y trouve des caniveaux, des trous de drainage et des puits. Les avaloirs sont situés en dessous du dallage et reliés à des tunnels sous les galeries.

En cas de système de drainage insuffisant ou défaillant, l'eau de pluie s'infiltre dans les blocs de fondation en latérite et dans le massif en terre. L'infiltration provoque une augmentation du contenu en eau du sol et, par conséquent, son affaiblissement. Les blocs de latérite sont particulièrement vulnérables aux cycles d'alternance de périodes sèches et humides et à l'altération météorique. Les fondations de la plupart des maçonneries d'Angkor sont construites en latérite. L'altération météorique des fondations en latérite a entraîné le déplacement des parties supérieures des structures en pierre. Au temple du Bayon, le sol a été érodé, ce qui a engendré le déplacement du massif de fondation, entraînant un mouvement et un dévers des structures supérieures en pierre des murs et des tours. Il est important d'étudier le système de drainage primitif et, en cas de défaillance, de le restaurer ou d'en effectuer l'entretien.

VI.14. Les fondations

Les ouvrages construits à Angkor reposent directement sur les couches de sol supérieures. Les monuments étaient construits sur des bases artificielles, le remblai constitué d'un mélange compacté de latérite et de sable. Le problème principal du tassement des fondations vient du contact direct des charges et du comportement des couches profondes du sol, comme évoqué précédemment.

Un agrandissement de la fondation peut remédier au problème si le désordre lié à la fondation est causé par une valeur de contrainte élevée, mais ne fonctionne pas pour les couches du sol plus profondes. La mise en place d'une nouvelle fondation ou l'élargissement de la fondation existante n'est efficace qu'une fois les charges transférées à la nouvelle structure. De nouveaux tassements sont prévisibles après construction de la nouvelle fondation jusqu'à ce qu'un nouveau point d'équilibre soit atteint.

VI.15. Les structures de soutènement

Les structures de soutènement sont normalement de type gravitaire, car le mur est stable grâce au poids qui s'oppose au dévers engendré par la poussée du sol et au frottement de la résistance au cisaillement contre le mécanisme de glissement défaillant.

Ces structures sont composées de blocs de latérite utilisés comme éléments des premières assises, sur lesquels des blocs de grès sont placés. L'absence de monolithes amène fréquemment à une déformation plastique et à une distorsion avec un dévers des blocs supérieurs. Une structure de soutènement est souvent construite pour abriter un remblai qui sert de fondation pour une partie du temple. Il est donc parfois difficile de découpler la fonction de structure de soutènement de celle de structure de fondation.

VI.16. Les temples-montagnes

Les temples-montagnes sont des collines artificielles, parmi les premières constructions angkoriennes, probablement élevées en utilisant les gravats des ouvrages hydrauliques et l'apport de sols sablonneux de surface. Ces montagnes sont érigées en terrasses diminuant progressivement vers le sommet jusqu'à une hauteur de 20 à 25 m du niveau du sol. L'inclinaison des pentes est de 45° sur les flancs. La pente naturelle (ou angle de frottement naturel) améliore la sécurité avec l'augmentation de l'angle de frottement interne et de la cohésion des sols.

La stabilité de l'ensemble a été assurée en positionnant un mur de soutènement composé de blocs de pierre simplement assemblés les uns sur les autres sans liant. Ces murs gravitaires présentent des désordres dans de nombreux cas. La reconstruction et la consolidation ont suivi différentes approches allant de l'anastylose à la construction de murs en béton armé.

La technique de construction d'origine des Khmers, celle de joints présentant du jeu entre les blocs adjacents, permettait de drainer les eaux infiltrées et empêchait l'ouvrage de subir une charge hydraulique arrière. Les blocs étaient en général en latérite, un matériel poreux qui permet une transition hydraulique par les surfaces de contact.

À l'endroit où des blocs de pierre effondrés ont été remontés dans le passé avec l'ajout d'un mortier d'étanchéité mais sans mise en œuvre d'un drainage alternatif adéquat, l'imperméabilité à l'eau a alors souvent compromis la stabilité de l'ensemble.

La latérite est un matériel qui s'altère et des moments critiques provoqués par des tassements de sol différenciés ont souvent causé la détérioration et la rupture des blocs de fondation.

Des tours lourdes sont fréquemment positionnées à proximité des angles extérieurs des terrasses, ajoutant une surcharge déséquilibrante à la structure.

VII. Le comportement de la structure et des désordres

VII.1. Les caractéristiques structurelles

Tous les ouvrages khmers sont construits sur des assises horizontales, en brique ou en pierre. Lorsque des ouvertures étaient nécessaires, les briques ou les pierres ont été positionnées progressivement en porte-à-faux. Les arches, les voûtes et les tours ont été construites à l'aide de cette technique. Certaines voûtes et baies ont été consolidées avec des poutres en bois dont la dégradation et la disparition de celles-ci au cours des siècles ont affaibli les structures.

VII.2. Les constructions en brique

Les temples préangkoriens ont en général été construits en brique ou avec un mélange de matériels, la brique servant pour la masse de l'ouvrage et le grès pour les détails plus importants comme les portes ou les linteaux. La masse du temple a été érigée, puis sculptée ultérieurement. Cette technique qui consiste à construire la forme de base du bâtiment puis de sculpter les détails in situ est l'une des caractéristiques de l'architecture khmère. Elle a été utilisée d'abord sur les temples en brique, puis a

été élaborée et raffinée lorsque l'utilisation de la pierre se généralisa.

La composition du liant entre les briques doit faire l'objet de recherches scientifiques supplémentaires. Il existe de nos jours deux théories principales concernant les liants utilisés par les anciens bâtisseurs khmers dans les temples en brique.

- **Le liant à base de chaux :**

Les briques étaient humectées, une petite quantité de chaux éteinte était ajoutée, puis les briques étaient frottées vigoureusement l'une contre l'autre, comme en témoignent les traces d'abrasion sur les joints. Ce procédé donnait des joints serrés et fermes, permettant ultérieurement la sculpture de la brique sans casser les joints. La chaux était probablement fabriquée en calcinant des coquillages provenant du Tonlé Sap, mais une étude récente indique que la chaux éteinte pouvait aussi venir de Battambang ou de Kampot.

- **Le liant à base de résine naturelle :**

Des recherches menées par la Fondation Leric sur les temples Cham de My Son au Vietnam ont révélé l'utilisation d'un liant organique. Il s'agit de la résine prélevée du *Diptherocarpus alatus*, un arbre appelé cheateal au Cambodge. Elle sert souvent de nos jours à calfeutrer les bateaux qui sillonnent le Tonlé Sap. Des tests ont été récemment menés au Cambodge et les premières conclusions

indiquent que les anciens constructeurs khmers utilisaient cette même résine.

La sculpture de la brique porte atteinte à la couche de surface cuite, exposant ainsi le centre moins dur. Il fallait donc consolider la partie centrale des briques sculptées en y insérant de petits fragments de brique afin de remplacer le matériau dégradé.

Des surfaces ont aussi été traitées à l'aide d'un mortier à base d'une poussière de brique à grains fins et de chaux, formant une couche de surface solide, lisse et uniforme pour la protection des briques.

Les briques étaient toujours posées horizontalement, si bien que les ouvertures sont en encorbellement. Le linteau, en général en pierre, ne soutient plus qu'une charge réduite. Le liant est posé de manière arbitraire et on trouve souvent une série de joints verticaux. Cette technique est plus évidente sur les structures en pierre à sec.

VII.3. Les constructions en grès

La technique de frottement qui a vu le jour avec les temples en brique a été déployée par les architectes khmers à mesure qu'ils en sont venus à préférer le grès. Cette technologie a été réadaptée en conséquence.

Les bas-reliefs du Bayon nous donnent un indice sur cette technique. La pierre supérieure était suspendue au-

dessus de la pierre inférieure en utilisant un système de portique et levier qui permettait à la pierre supérieure d'être balancée d'avant en arrière jusqu'à ce que les deux surfaces soient lisses par abrasion mutuelle. Le grès est une pierre qui permet l'utilisation de cette technique, car elle contient beaucoup de silice abrasive.

Les assises très resserrées ainsi rendues possibles augmentaient la stabilité et permettaient aux surfaces d'être sculptées plus tard, sans que les angles des blocs soient à fleur. Le joint horizontal est donc bien à la base de l'architecture khmère qui a permis par la suite la construction des voûtes en encorbellement si caractéristiques.

La plupart des détails architecturaux ont été sculptés sur le site : les ouvertures, les colonnettes, les linteaux, ainsi que les éléments décoratifs comme les bas-reliefs.

Les joints horizontaux et donc les techniques de cales en encorbellement donnent aux tours, aux voûtes et aux arches un comportement structurel particulier. En principe, si l'on veut éviter le glissement des joints, la ligne des forces de compression doit être aussi près que possible de la ligne perpendiculaire aux joints. Cependant, dans ces structures, les forces intérieures sont inclinées et un effort de cisaillement se crée (à la tangente des joints), ce qui crée le risque de dépasser la force de frottement et de finir par un glissement entre les joints eux-mêmes. Pour empêcher ce résultat, il faut des forces verticales élevées, donc des structures lourdes, prenant la forme d'une «

tour » et non d'un « dôme », comme cela se voit en Europe où on préfère les joints radiaux pour éviter le risque de glissement.

VII.4. Les structures en latérite

Les structures de fondation étaient en général construites sur un socle constitué de blocs de latérite jointoyés à sec. Les dimensions de chaque bloc sont plus ou moins uniformes. Le comportement du sol peut imposer des contraintes importantes sur les maçonneries dont la force dépend de la résistance au cisaillement et donc du frottement entre les blocs le long des surfaces jointoyées. Lorsque ces dernières sont atteintes ou se dégradent à cause d'une altération météorique, le frottement est moindre, ce qui provoque des mouvements et des désordres, notamment dans le cas de tassement inégal des sols.

VII.5. Les désordres structurels

Par rapport aux structures au jointement à sec, les constructions en brique ont une répartition plus uniforme de leur résistance, car le liant qui jointoie les briques permet une certaine résistance au cisaillement sur les joints horizontaux ; donc, il n'y a que très peu de glissement entre les briques. En cas de contraintes supérieures à la force de la brique, des fissures se produisent dont le tracé est en général perpendiculaire aux contraintes de traction principales. En outre, la force peut être affaiblie par la dégradation du matériel.

Les constructions en pierre à sec se comportent différemment puisque la structure est rigide jusqu'au point où les forces de cisaillement s'exerçant sur les joints deviennent plus faibles que la friction. Des mouvements relatifs entre les blocs ne peuvent se produire que lorsque les efforts de cisaillement sont supérieurs à la friction. Des mouvements relatifs importants peuvent se solder par l'effondrement de la structure.

Des contraintes provenant de l'intérieur de la structure peuvent résulter de processus de dégradation, de l'action des racines des arbres, etc. Mais la raison principale est liée au tassement des sols, à la déformation vers l'extérieur des murs de soutènement des terrasses et aux mouvements verticaux ou à la rotation des fondations. La foudre peut aussi être un facteur de désordre pour les structures.

Ces mouvements relatifs des joints modifient le contact entre les blocs de pierre, créent des glissements et/ou une concentration d'actions mutuelles suivant des lignes ou des points isolés (au lieu d'avoir des pressions réparties sur les surfaces de contact d'origine). Ainsi, lorsque le phénomène progresse, des fissures se produisent qui réduisent la capacité de portance jusqu'à déformer la structure entière qui finit par s'effondrer (cf. paragraphe VIII.2).

L'écrasement est généralement constaté sur des zones spécifiques où de grandes déformations ou des détachements structurels ont augmenté fortement l'effort de

compression. On retrouve fréquemment ce phénomène sur les piliers qui soutiennent des linteaux ou des frontons qui, en raison de leur poids et de la déformation générale, se détachent de la structure principale.

L'écrasement est aggravé par l'inclinaison relative entre l'effort de compression actif et le plan de stratification des maçonneries en brique et grès.

VII.6. Les désordres provoqués par les mouvements de sols

En règle générale, les déformations des sols ne sont pas uniformes. Même lorsqu'elles semblent l'être, c'est fréquemment la raideur de la structure qui force un mouvement rigide, c'est-à-dire entraînant des déformations uniformes ou linéaires. Dans ce cas, les contraintes (principalement horizontales) s'accumulent peu à peu dans la structure et d'un seul coup, dès qu'elles deviennent excessives, des fissures et des désordres importants peuvent apparaître.

Dans une tour, trois types de problèmes peuvent se produire :

- Les déformations des sols résultant de leurs caractéristiques intrinsèques ou de la rigidité (et la force) de la tour sont linéaires. Cela provoque un dévers de celle-ci. Le cas le plus célèbre est celui de la Tour de Pise.

- Les déformations des sols ne sont ni uniformes ni linéaires, parce que la structure n'est pas suffisamment raide et résistante. Dans ce cas-là, il faut faire face à deux situations différentes, même si des situations intermédiaires et combinées existent, par rapport à la répartition de la force de la structure :
- Des fissures verticales divisent la tour – ou la structure dans son ensemble – partant du bas vers le haut et la séparant en deux voire plusieurs parties qui peuvent pencher vers l'extérieur (p. ex. la tour inférieure sud-est de Prè Rup). Cela se produit lorsque des déformations des sols non uniformes se font vers le bas et que la force de la structure est très faible.
- Des fissures, des déformations, des cassures de linteaux, etc. se concentrent plus particulièrement dans la partie basse intermédiaire de la tour. Cela se produit lorsque la déformation du sol dans la structure diminue en s'éloignant des parties inférieures et notamment lorsque la déformation du sol se fait vers le haut.

Sur les structures archées ou voûtées, les mouvements de fondation, et notamment lors de rotations vers l'extérieur, produisent un glissement entre les blocs dans les joints, ouvrent des fissures et modifient la géométrie, réduisant

le contact entre les blocs qui se limite et se concentre aux angles. Cela peut engendrer un écrasement localisé entraînant un écroulement.

Lorsque le bâtiment est situé à proximité d'un mur de soutènement ou d'un canal, on constate souvent un déversement dans le sens de celui-ci. Sur des sols sablonneux, le sable peut s'échapper des interstices entre les pierres, accentuant ce phénomène.

Lorsqu'on soupçonne des mouvements de sols, la mise en place d'un système de suivi peut s'avérer très utile. Le contrôle continu du dévers des murs de la tour NI au Prasat Suor Prat a indiqué une augmentation soudaine de l'inclinaison de 200 mm/24 h après de fortes précipitations en octobre 1997, alors que ce mouvement était de nature cyclique avant cet événement.

VIII. Les critères et les techniques de consolidation des structures

VIII.1. Critères généraux

Il faut autant que possible respecter les techniques de construction d'origine, à condition que celles-ci soient compatibles avec les exigences de sécurité de la structure et des fondations. L'un des facteurs importants déterminant les critères de l'intervention concerne le type de déformation et de fissures subi par la structure et surtout si ces déformations sont maintenant stables ou non.

Si les déformations sont stables, il est nécessaire de vérifier si elles ont pu mettre en danger la stabilité de la structure et, si oui, si l'on peut ou non recouvrer celle-ci en prenant des mesures adéquates (chaînage, goujons, injection de remplissage, étriers, etc.).

De nombreux mécanismes sont disponibles pour recouvrer les déformations. Il faut se concentrer plus particulièrement sur les contraintes induites afin de prévenir d'éventuels désordres. Les interventions doivent rester invisibles. Si cela se révèle impossible, il faut évaluer attentivement l'impact esthétique éventuel sur le bâtiment avant de prendre une décision finale.

Laisser un site dans son état de ruine archéologique, avec toutes les traces de son histoire, est un choix possible

qu'il convient d'évaluer en relation avec l'environnement. La technique consistant à démonter/remonter des structures gravement déformées ou présentant de graves risques, peut être envisagée mais seulement après avoir analysé et évalué la nécessité et la faisabilité de cette intervention et pris en compte le risque lié à l'altération de l'authenticité du monument. En outre, le traumatisme qu'ont subi l'ouvrage et ses matériaux constitutifs doit être évalué attentivement et pris en considération.

Lorsque la décision est prise de procéder au démontage/remontage, il faut prendre bien soin de préserver l'intégrité des matériaux. Toutes les données portant sur l'état actuel des ouvrages doivent être enregistrées (les axes, les assises de pierre, les arasements, etc.).

L'anastylose ne doit pas être confondue avec la technique de démontage/remontage, même si les deux approches ont des aspects communs. L'anastylose consiste à remettre à leur emplacement d'origine des pierres ou des fragments écroulés ou enlevés précédemment. Dans certains cas, l'insertion de pierres neuves peut aussi être pratiquée.

VIII.2. Choisir la panoplie de mesures

Afin de comprendre les véritables risques et de décider des mesures à mettre en œuvre, il est premièrement indispensable d'interpréter les signes visibles sur la structure. Ces signes sont les suivants :

- Des fissures limitées qui, sur les ouvrages construits en pierre à sec, suivent un parcours déterminé par les glissements entre les blocs. Ces phénomènes sont en général peu dangereux et la consolidation n'est pas indispensable.
- Des fissures importantes peuvent avoir une incidence sur la forme des bâtiments et provoquer des déformations, notamment des inclinaisons et des dévers des façades vers l'extérieur.

Cela peut entraîner des désarticulations et un affaiblissement de la structure qui peuvent faire empirer la situation selon le processus de dégradation en cours. Les mesures pour remédier à ce type de désordres peuvent inclure la mise en place de tirants, de chaînages, d'ancrages, etc. Afin que ces tirants ne soient pas visibles, ils peuvent être insérés dans des trous forés dans les maçonneries ou dans les pierres.

Dans certains cas, les tirants, les chaînes, etc. peuvent être mise en précontrainte afin de les rendre actifs immédiatement, de façon à créer des forces favorables ou à réduire les déformations. S'agissant des matériaux, l'acier inoxydable, qui résiste à la corrosion, est utilisé le plus couramment. Des matériaux synthétiques modernes, notamment les fibres de carbone ou les aramides, offrent des possibilités intéressantes en raison de leur durabilité.

- Des déformations conséquentes accompagnées d'importants glissements de pierres dans les structures construites à sec peuvent créer des forces supplémentaires provoquées par le changement de géométrie. Lorsque les pierres se déchaussent vers l'extérieur, elles ne jouent plus leur rôle de soutien.

Ces situations peuvent se révéler dangereuses et un frettage peut se révéler insuffisant. Il y a alors deux approches possibles : le démontage/remontage (cf. paragraphe VIII.3 ou le recouvrement de la déformation (cf. paragraphe VIII.4).

- Des mouvements de grande envergure, par exemple l'inclinaison d'une tour, peuvent créer certains risques (le déversement), même si la structure ne montre pas de désordre significatif. Dans ces cas, il faut procéder à un suivi et vérifier si la situation est stable ou non (cf. paragraphe VIII.5). Ensuite, évaluer les forces supplémentaires créées par le décentrage de la charge statique et vérifier si la stabilité requise a été opérée.

Lorsque des interventions sont nécessaires, les critères mentionnés dans le paragraphe VIII.5 peuvent être suivis.

- Les arches et les voûtes (dans l'architecture khmère, elles s'apparentent plus à des tours) construites à sec posent des problèmes spéci-

fiques en raison de la technique de construction sur joints horizontaux. Les mouvements des blocs entraînent non seulement un glissement, mais aussi une altération de leur point d'appui. En effet, le plan horizontal de contact entre deux blocs peut être réduit à une zone limitée, à proximité d'un angle alors que sur l'autre angle le contact ne se fait plus. L'ensemble de la structure se désarticule, la force d'ensemble est réduite et les forces se concentrent sur les angles. Ceci crée des contraintes élevées qui entraînent des fissures localisées (écrasement) et une détérioration progressive. Les causes de ce type de phénomène sont en général liées à un mouvement vers l'extérieur des piliers ou des murs sur lesquels repose l'arche/la voûte.

Les mesures à mettre en œuvre peuvent être choisies en se basant sur les constatations suivantes : Si le décollement reste peu important et qu'aucun signe de détérioration du bloc n'est visible, la situation peut rester comme telle (ou être améliorée en installant des ancrages localisés, des tirants, etc.). Un suivi doit être effectué en cas de changement significatif à l'avenir.

Si les mouvements venaient à s'aggraver et mettent en danger l'équilibre de la structure, il y a deux options : effectuer un démontage/remontage selon les recommandations données dans le paragraphe suivant ou bien recouvrir une partie

des déformations afin de revenir à une situation plus stable. Il convient alors, dans un premier temps, de rehausser la voûte/arche à l'aide de vérins et ensuite de pousser à l'horizontale vers l'intérieur les murs ou les piliers (cf. paragraphe VIII.4).

- Des structures et des murs de soutènement se rencontrent fréquemment à Angkor, étant donné le rôle joué par les galeries dans les temples-montagnes. Les mesures à mettre en œuvre dépendent des conditions particulières et peuvent inclure la réduction de la charge, l'amélioration du frottement interne du sol, l'agrandissement de la zone potentiellement en mouvement, la construction d'un réseau de drainage efficace ou l'encaissement du massif de terre.

En cas d'écroulement de berges, il faut viser deux objectifs dans le respect des critères du projet. D'abord, augmenter la capacité de résistance des sols en accroissant la densité du sol in situ sur lequel la valeur de l'angle de friction interne dépend strictement. Le deuxième objectif consiste à améliorer les conditions de drainage dans le massif de terre pour prévenir la formation d'un trop-plein de pression résiduelle dans les pores par rapport au niveau de l'eau à l'extérieur de la berge. Cela peut être facilement mis en œuvre en faisant appel à des tranchées de boue d'un sol plus grossier, en faisant communiquer avec la douve

ou la digue et en prévoyant un système de drainage adéquat des eaux de surface. L'utilisation de matériaux synthétiques comme des fibres géosynthétiques peut aussi être encouragée afin d'atteindre les deux objectifs.

VIII.3. Le démontage/ remontage

Il est parfois nécessaire de reconstruire certaines parties d'une structure pour en garantir la stabilité, assurer une meilleure conservation (étanchéité, etc.) ou réinsérer des éléments architecturaux disparus. Cependant, il faut éviter autant que possible de reconstruire.

Lorsque la reconstruction s'avère nécessaire, les techniques et les nouveaux matériaux doivent être compatibles. Il convient de suivre les mêmes formes et géométries que l'original. De plus, des traces doivent être laissées afin que les experts au moins puissent distinguer l'ancien et le neuf. Plus rarement, des insertions peuvent être effectuées dans certains cas à condition qu'elles restent peu visibles. Si cette dernière intervention s'avère nécessaire, il faut la documenter en détail aussi bien par des dessins et que par des photos.

Lorsque la forme et la géométrie d'origine sont inconnues, l'aspect des nouveaux éléments devrait autant que possible rester simple et se fondre avec le reste du décor, de façon qu'ils interfèrent le moins possible avec les

structures d'origine et n'induisent pas quelque interprétation arbitraire.

Dans les ouvrages construits à sec, au-delà des mesures de consolidation, il est fréquemment nécessaire de remplacer des blocs écroulés. Dans ce cas, outre le cas de tout démonter et remonter, différents types de problèmes peuvent surgir :

- Fréquemment, on ne retrouve pas certains blocs indispensables à la stabilité du monument. Si de telles lacunes ne sont pas trop nombreuses, l'insertion de nouveaux blocs, taillés pour imiter les blocs d'origine, peut être effectuée.
- Lorsque des éléments structurants encore debout (en général les murs et les piliers) sont déformés et qu'il est impossible de remettre correctement en place les blocs tombés ou les blocs neufs, il faut obligatoirement tolérer des blocs d'une géométrie modifiée. Autant que possible, il faut essayer de recouvrir une partie des déformations. La façon de procéder doit être soigneusement évaluée et mise à l'essai et ne devrait présenter aucun risque de dégât causé par des fissures ou de remise à fleur avec les blocs constitutifs.
- Il faut en outre procéder à la sélection d'une carrière et résoudre les problèmes d'extraction : les pierres neuves doivent être compatibles avec la structure d'origine sur les plans physique, géométrique et architectural.

- Le niveau de finition des pierres neuves doit être adapté à chaque situation. Si aucune information sur les motifs de décors n'est disponible, il faut se contenter de reproduire la géométrie.
- Des détails peuvent être grossièrement reproduits, mais seulement lorsque les motifs originaux sont connus.
- Les décors figuratifs appartenant à un contexte iconographique ne devraient pas être reproduits lorsqu'il y a risque de falsification et d'interprétation subjective de la pierre neuve taillée, qui pourrait différer de l'originale perdue et inconnue.
- Lorsqu'une pierre neuve doit être insérée à côté d'une pierre fortement dégradée, un problème délicat d'esthétique se pose. La solution doit prendre en compte l'harmonie générale de la zone traitée.
- Le réemploi de pierres cassées nécessite généralement d'assembler les parties détachées avec un adhésif et de les consolider à l'aide de goujons. Il est souvent nécessaire de faire des insertions de blocs neufs à côté d'anciens blocs. Ces blocs doivent être de la même nature et apparence que les originaux. L'insertion de blocs doit se limiter aux endroits présentant des lacunes et uniquement si cette opération est indispensable pour la

stabilité et une compréhension globale du monument.

VIII.4. Le recouvrement des déformations

Le recouvrement des déformations est une technique assez récente qui s'est développée avec la disponibilité d'outils plus sophistiqués (vérins, etc.) et du système de suivi informatisé toujours indispensable lors de l'intervention.

Le projet d'ensemble ainsi que le programme de chaque étape de l'intervention doivent être préparés en détail et prendre en compte les points suivants :

1). L'équipement :

Celui-ci comprend les outils (vérins hydrauliques, etc.) qui permettront d'exercer une compression ou une traction sur la structure concernée, ainsi que des pompes manuelles ou électriques. Ces dernières se connectent au vérin par un système oléodynamique accompagné de jauges multi-voie, aussi bien analogues que numériques. Des manomètres permettent de lire à tout instant la mesure de la pression exercée sur les vérins. Un système de suivi doit être mis en place pour mesurer les contraintes et tout mouvement (dévers, etc.) ou la déformation subie par la structure.

2). La préparation de la structure :

La préparation de la structure a deux objectifs principaux :

- Au cas par cas, mettre en position les vérins là où des forces s'exercent sur la structure. Une analyse préliminaire évalue ces forces et leur rapport avec la déformation qui doit être recouverte.
- L'isolation de la partie de la structure sujette au déplacement et des lignes (en général des fissures) où les mouvements relatifs se produisent. Dans le cas de fissures dont la largeur doit être réduite, il est nécessaire d'enlever les débris accumulés, enfin, tout ce qui pourrait empêcher les mouvements.

3). Les phases de recouvrement des déformations :

En général, il n'est possible de recouvrir qu'en partie les mouvements ou les déformations, car ils sont souvent de nature inélastique, irréversible. Pour faciliter cette intervention, il est possible d'opérer des coupes ou des discontinuités artificielles.

La pression exercée sur les vérins est augmentée progressivement, en général avec des valeurs différentes selon les vérins, installés sur la base d'analyses préalables dont le but est d'éviter toute contrainte supplémentaire sur la structure lors de cette phase.

À chaque étape, le système de surveillance enregistre les pressions et les déplacements et les compare avec des valeurs fixées d'avance. Il est assez difficile en théorie de prévoir la bonne proportion entre la pression et le mouvement en raison de l'incertitude du mécanisme qui sera engendré par le vérin et selon la véritable rigidité de la structure endommagée.

C'est la raison pour laquelle lors des premières étapes, les proportions mesurées entre les pressions et les déformations servent de référence et permettent de recalibrer le modèle théorique. Le système de surveillance sert à signaler toute contrainte trop importante sur la structure qui risque de provoquer de nouveaux désordres sur la structure.

4). L'intervention finale :

En se basant sur les résultats et plus particulièrement sur le pourcentage des déformations recouvrées, on doit juger de l'opportunité de prendre des mesures supplémentaires. Dans la plupart des cas, on s'arrête là, à moins qu'il ne s'agisse d'éliminer la cause du désordre si celui-ci est encore présent (par exemple les racines d'arbres).

Pour finir, il est bon de souligner que cette technique peut sembler plus compliquée qu'elle ne l'est en réalité. S'il faut effectivement avoir une certaine expérience dans ce domaine, les résul-

tats permettent souvent de résoudre des situations difficiles tout en respectant la valeur historique de l'ouvrage.

VIII.5. Les structures souffrant de tassements de sols non stabilisés

Le tassement de sols constitue le phénomène le plus important, en plus de la dégradation des matériaux, influant sur le comportement structural. Les problèmes se révèlent fréquemment très complexes. Il est nécessaire d'anticiper la tendance de ce phénomène et d'en évaluer les conséquences, car les contraintes supplémentaires subies par la structure provoqueraient des dévers plus importants. Un système de surveillance est généralement nécessaire et l'examen des relevés en dit long sur l'évolution du phénomène.

Trois options sont habituellement disponibles :

- Éliminer la cause, c'est-à-dire réduire le facteur déstabilisant agissant sur le sol (stabiliser la nappe phréatique) ou sur la structure (agrandir l'assise des fondations, insérer des pieux sous les fondations actuelles, etc.). Ces interventions, en général compliquées, peuvent engendrer des altérations importantes sur la structure d'origine et peuvent amener à devoir démonter la structure et à la remonter, ce qui risquerait d'entraîner une perte de valeur irréversible. Seulement dans des

cas exceptionnels, par exemple si le phénomène s'accélère ou s'il n'existe pas d'autre alternative raisonnable, peut-on mettre en œuvre cette option (qui est techniquement la plus fiable).

Une approche intéressante pour contrer les dévers consiste à utiliser la technique de creusement souterrain, dont l'objectif est de rendre le sol plus mou dans la zone où le tassement est moins prononcé, en y enlevant une partie de celui-ci afin de créer des cavités souterraines dans la zone du sol en amont de l'ouvrage. Ces cavités se bouchent automatiquement produisant des tassements artificiels qui atténuent le dévers. Cette technique a été mise en œuvre assez récemment sur la Tour de Pise pour réduire son dévers.

- Éliminer (ou bien atténuer) les impacts, donc réduire l'hyperstaticité de la structure, en créant des soutiens flexibles, des joints, etc. afin de réduire ou d'éliminer les contraintes engendrées par la déformation du sol. Cette option, efficace pour des bâtiments complexes, est rarement appliquée sur un monument.
- Augmenter la force de la structure jusqu'à des valeurs permettant non seulement de résister aux contraintes supplémentaires venant du sol, mais aussi de donner une rigidité et une continuité nouvelles à l'ensemble pour pouvoir résister à des contraintes provoquées par l'éventuel tasse-

ment de sol à l'avenir. Ces travaux ne peuvent être accomplis que si l'évolution du phénomène ralentit ou si, dans tous les cas de figure, les déformations et contraintes induites correspondantes se limitent à des valeurs acceptables. Parmi les mesures possibles, citons la pose de chaînages, de boulonnages ou de tirants (en utilisant soit de l'acier inoxydable, soit des fibres synthétiques) et la reconstruction partielle des parties écroulées. Un système de surveillance doit être associé à ces interventions afin de suivre de nouvelles poussées ou des amplifications à l'avenir.

IX. La carte des risques

Plusieurs monuments sont dans des états jugés dangereux, cependant le risque de dégâts irréversibles ou d'écroulement diffère selon le cas.

Il est donc nécessaire, en raison de l'urgence différente des situations et du manque de moyens financiers, d'analyser au cas par cas le niveau des risques pesant sur chaque monument ou certaines parties d'un monument, afin d'évaluer leur importance pour le monument, l'état des dégâts et le coût des travaux de consolidation. Il est ainsi possible d'établir une liste des priorités.

Les travaux devraient être organisés en utilisant une méthode informative.

La carte des risques et la liste des priorités s'imposent lorsqu'on élabore un programme de conservation. Il est indispensable de dessiner différentes cartes montrant les risques sur les ouvrages (qui se concentrent sur les macro-problèmes de stabilité et d'effondrement des monuments), sur les pierres, les sculptures et les surfaces sculptées et décorées (qui concernent surtout les problèmes de conservation liés à des matériaux. La carte des risques ne présente pas seulement les désordres existants, mais aussi ceux pouvant se produire à l'avenir.

Des risques peuvent venir des altérations météoriques, d'un changement environnemental (les arbres, la végéta-

tion), des tassements des sols, des activités de l'homme (p. ex. le tourisme), etc.

Un relevé détaillé est en général suffisant pour identifier les risques les plus importants. Dans d'autres cas, des investigations et des analyses plus poussées seront exigées. En général, trois niveaux de risques sont mis en valeur : le risque zéro (la situation est saine), le risque 1 (danger possible), le risque 2 (état d'insécurité, menace imminent d'effondrement).

La liste des priorités se base sur la carte des risques, mais prend en compte des facteurs supplémentaires tels que la valeur intrinsèque du monument et le coût des travaux nécessaires pour réduire ou éliminer les risques. Les priorités sont alors classées selon une base bénéfice/coût, prenant en compte plusieurs facteurs : l'importance du risque, les conséquences si on n'y remédie pas, le coût d'y remédier, le tout en fonction de la valeur intrinsèque et de l'importance du monument.

La liste des priorités inclut le délai dans lequel il faudrait procéder à la mise en œuvre des mesures adéquates. Trois niveaux se détachent :

- a). **Les mesures critiques (ou de sauvetage)** : ces mesures restent souvent temporaires et sont requises lorsque la structure présente des risques importants d'effondrement. Elles doivent être prises dans un délai très court. Ces mesures deviennent en général caduques et doivent être révi-

sées et remplacées par des mesures définitives. En général, les mesures critiques comprennent les étaielements, le chaînage temporaire, etc.

En raison de leurs spécificités, les mesures critiques ne peuvent pas toujours faire partie d'un cadre plus général d'un programme de conservation et de consolidation. Puisqu'elles sont provisoires, une date limite doit être déterminée qui établit clairement le calendrier et la méthodologie des interventions de conservation définitives. Les consolidations critiques doivent être réversibles.

Dans toute la mesure du possible, il faut préférer des interventions qui font partie de la première phase de travaux de consolidation définitifs.

Les matériaux utilisés pour les consolidations critiques ne doivent jamais altérer la structure lors de leur période d'utilisation.

Il faut un suivi régulier de ces interventions critiques de consolidation afin de s'assurer qu'aucun dégât ou altération n'a été causé.

Lorsque l'utilisation de matériaux dégradables ne peut être évitée, la campagne de suivi doit être plus fréquente pour s'assurer que les systèmes de consolidation sont toujours efficaces et ne se sont pas déplacés ou détériorés.

En cas d'utilisation du bois, il doit être traité afin de ne pas être attaqué par les insectes et les champignons.

La planification et la mise en œuvre des mesures critiques passent par des phases très délicates exigeant la présence d'experts sur toute la durée des opérations pour s'assurer que les ouvriers travaillent en toute sécurité et qu'il n'y aura pas de dégâts lors de la mise en place et de l'application des mesures.

Une documentation graphique et photographique complète des mesures de consolidation critiques doit toujours être établie.

- b). Les mesures urgentes :** elles doivent être prises le plus rapidement possible, même il faut compter suffisamment de temps pour faire une analyse détaillée de la structure. Ces mesures seront donc le fruit d'analyses et font normalement partie de la première phase d'interventions définitives.
- c). Les mesures préventives :** ces mesures concernent des situations où la structure elle-même n'est pas immédiatement en danger, mais pourrait l'être à l'avenir, notamment si certains événements se produisent, par exemple une tour à proximité d'un mur de soutènement montre des signes de mouvement. Mettre en œuvre des mesures préventives reste la meilleure stratégie

pour la sauvegarde du patrimoine architectural. La maintenance est souvent l'option la moins coûteuse et la plus efficace, même si parfois elle ne suffit pas sous tous les rapports.

Comme cela a été souligné plus haut, différentes cartes des risques et listes des priorités doivent être élaborées pour les divers types de structures et/ou de matériaux et les activités à mener. C'est notamment le cas pour la conservation de la pierre et des surfaces décorées. Les risques peuvent être le fait d'infiltrations, de remontées capillaires, de couches biologiques, de végétation qui pousse sur la structure, des efflorescences, de dégradations causées par les visiteurs, etc. La carte des risques doit être considérée comme un document en constante évolution dans le cadre de l'institution effectuant une intervention de conservation. À la fin de l'intervention de conservation, la carte des risques doit être mise à jour pour tenir comptes des changements.

X. Remarques finales et remerciements de la part de l'APSARA et de l'UNESCO

La présente charte fait clairement reconnaître l'importance des recherches en cours et, par voie de conséquence, l'évolution constante des méthodes et des matériaux de conservation. Elle a commencé à prendre forme il y a dix ans (2002) par les soins d'un groupe interdisciplinaire de professionnels de la conservation qui œuvrent en permanence dans la conservation du patrimoine et qui, au cours des 20 dernières années, se sont intéressés tout particulièrement aux questions complexes que pose la sauvegarde d'Angkor.

Nous tenons à remercier très sincèrement le groupe de travail sous la présidence du professeur Giorgio Croci. Le dévouement de ces hommes et de ces femmes à la cause d'Angkor a joué un rôle essentiel dans la rédaction de cette charte, fruit de leur longue pratique spécialisée sur le terrain. Ces recommandations n'ont d'autre ambition que de proposer un ensemble d'orientations aux professionnels du patrimoine, d'aujourd'hui et de demain.

- Fin -

Charte d'Angkor

Orientations pour la sauvegarde d'Angkor, site du patrimoine mondial