EUR-OPA MAJOR HAZARDS AGREEMENT
ACCORD EUR-OPA RISQUES MAJEURS

COUNCIL OF EUROPE CONSEIL DE L'EUROPE

Strasbourg, 20 novembre 2008 AP/CAT (2008) 44

VULNERABILITE DU PATRIMOINE CULTUREL AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Rapport de

C. SABBIONI
Institut des Sciences de l'Atmosphère et du Climat
Conseil national de la recherche, Bologne, Italie

M. CASSAR
Centre pour le patrimoine durable, Collège universitaire de Londres, RU

P. BRIMBLECOMBE
Université d'East Anglia, RU

R.A. LEFEVRE
Université de Paris XII, France

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ 3

INTRODUCTION 4

1. ACTIONS DES INSTITUTIONS FACE AUX RISQUES POSES PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE AU PATRIMOINE CULTUREL 5

1.1. UNESCO 5

1.2. COMMISSION EUROPÉENNE 6

1.3. PARLEMENT EUROPÉEN 6

1.4. CONSEIL DE L'EUROPE 7

1.5. CENTRE POUR LE PATRIMOINE DURABLE (COLLÈGE UNIVERSITAIRE DE LONDRES) 7

1.6. PROJET ARCHE DE NOÉ DE L'UE 8

1.7. CENTRE UNIVERSITAIRE EUROPÉEN POUR LES BIENS CULTURELS (RAVELLO, ITALIE) 9

2. ANALYSES DU RISQUE 9

2.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE 9

2.2. IMPACT DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LE PATRIMOINE CULTUREL 10

2.3. PROJET « ARCHE DE NOÉ » DE L'UE 11

2.3.1. Approche méthodologique 11
2.3.2. Description et prévision de l'impact global du changement climatique sur les structures et matériaux de construction 14
2.3.3. Stratégies d'atténuation et d'adaptation aux effets du changement climatique 16
2.3.4. Diffusion des informations sur les effets du changement climatique et stratégies d'adaptation pour le patrimoine bâti et les paysages culturels 17

3. EVOLUTION FUTURE 20

3.1. RECHERCHE SCIENTIFIQUE FONDAMENTALE 20

3.2. RECHERCHE APPLIQUÉE 21

4. RECOMMANDATION 21

4.1 RECHERCHE 21

4.1.1. Financement 21
4.1.2 Coopération et compétitivité 22
4.1.3 Masse critique 22

4.2 POLITIQUE 22

4.2.1 Niveau mondial 23
4.2.2 Niveau européen 23

4.3 FORMATION 23

4.3.1. Renforcement des capacités scientifiques 23
4.3.2 Transfert des connaissances à la pratique 24

5. REFERENCES 25

Résumé

L'Europe a assumé un rôle de leadership en lançant des projets de recherche (par ex. ARCHE DE NOE) sur l'impact du changement climatique sur le patrimoine culturel, à une époque où l'on s'attache à améliorer la qualité de l'air en zones urbaines. Alors que la température est souvent considérée comme l'aspect clé du changement climatique, les travaux réalisés, privilégiant une approche quantitative, ont permis de démontrer que la principale menace qui pèse sur le patrimoine est l'eau. Cette menace se traduit par de fortes précipitations, des inondations ou des tempêtes. Ces précipitations peuvent provoquer la surcharge des toitures et le débordement des gouttières, infiltrer les matériaux traditionnels (par ex. chaumes, pisés, torchis, etc.) ou déposer des polluants sur les bâtiments, tandis que les inondations entraînent des pertes catastrophiques. D'une manière plus subtile, mais cependant plus systématique, les variations d'humidité affectent le développement de micro-organismes sur la pierre et le bois, et favorisent la formation de sels qui dégradent les surfaces et accélèrent la corrosion. En dépit du caractère intermittent et violent des futures précipitations, des étés plus secs favoriseront l'altération de la pierre par les sels et assécheront les sols qui protègent les vestiges archéologiques et soutiennent les fondations des constructions.

Les futurs travaux de recherche à mener en matière de changement climatique et de patrimoine culturel peuvent être classés selon 5 thèmes, à savoir :

1. Comprendre la vulnérabilité des matériaux aux variables climatiques, afin d'évaluer de manière fiable l'impact futur
2. Suivre les évolutions, notamment sur des échelles de temps de l'ordre de la décennie, voire du siècle
3. Modéliser et prévoir les effets du changement climatique sur le patrimoine avec une résolution spatiale et temporelle élevée et une estimation de la fiabilité
4. Développer des outils de gestion du patrimoine culturel dans un contexte de climat changeant
5. Prévenir les dommages en développant des stratégies à long terme.

INTRODUCTION

Dans un monde marqué par le changement climatique, notre patrimoine sera confronté à un éventail de pressions nouvelles, bien différentes de celles du passé. Les pratiques de gestion devront évoluer pour réduire l'impact des nouvelles menaces et prendre conscience de la nécessité de passer de mécanismes de dommages tels que la pollution de l'air à un processus biologique et physique différent qui générera des types de dommages qui seront certainement différents de ceux constatés au cours du siècle dernier.

Le présent rapport repose sur les résultats du projet « Arche de Noé » sur « *Impact du changement climatique global sur le patrimoine bâti et les paysages culturels* », financé par la Commission européenne dans le cadre de son Sixième programme-cadre pour la recherche.

En plus des produits escomptés du projet « Arche de Noé » (http://noahsark.isac.cnr.it/deliverables.php), les documents suivants ont été pris en compte :

- Rapport n° 22 du Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO : « *Changement climatique et patrimoine mondial, Rapport sur la prévision et la gestion des effets du changement climatique sur le patrimoine mondial et Stratégie pour aider les États parties à mettre en œuvre des réactions de gestion adaptées* » Paris, mai 2007, 55 p.; (http://whc.unesco.org/documents/publi_wh_papers_22_fr.pdf)

- Le rapport intitulé «*Climate Change and the Historic Environment: Adapting Historic Environments to Moisture-Related Climate Change*», M. Cassar (2005). (http://www.eprints.ucl.ac.uk/archive/00002082/01/Publish_Climate_Change_Report_05.pdf)

- Le rapport « *Engineering Historic Futures Stakeholders Dissemination and Scientific Research Report*» M. Cassar (2006) http://www.ucl.ac.uk/sustainableheritage/ehf_report_web.pdf)

Le présent rapport dresse un état des lieux, évoque les développements futurs et formule des recommandations.

1. ACTIONS DES INSTITUTIONS FACE AUX RISQUES POSES PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE AU PATRIMOINE CULTUREL

1.1. UNESCO

L'un des problèmes les plus difficiles auxquels sont confrontés les responsables du patrimoine mondial est celui du changement climatique, notamment pour les 878 biens du patrimoine naturel et culturel mondial (à la date du 20 septembre 2008), listés pour leur valeur universelle exceptionnelle suite à l'adoption de la Convention concernant la protection du patrimoine mondial culturel et naturel http://whc.unesco.org/archive/convention-fr.pdf) par la Conférence générale de l'UNESCO lors de sa dix-septième session à Paris, le 16 novembre 1972. Ils comprennent 679 biens culturels, 174 biens naturels et 25 biens mixtes dans 145 États parties à la Convention.

La question de l'impact du changement climatique sur les biens du patrimoine naturel et culturel mondial (UNESCO, 2007) a été portée à l'attention de la vingt-neuvième session du Comité du patrimoine mondial à Durban en 2005 par un groupe d'organisations et de personnes concernées, y compris des groupements s'occupant d'environnement. Ledit groupe a déclaré au Comité que le changement climatique met en péril la pérennité de cinq sites essentiels du patrimoine mondial : Belize et la Grande Barrière, le Parc international de la paix Waterton-Glacier (aux USA et au Canada), le Mont Everest et les Andes péruviennes. Le Comité du patrimoine mondial a demandé au Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO, en collaboration avec les Organisations consultatives (l'IUCN (Union mondiale pour la nature), l'ICOMOS (Conseil international des monuments et sites) et l'ICCROM (Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels), les États parties et les pétitionnaires concernés, de mettre en place un large groupe de travail constitué d'experts sur les effets du changement climatique sur le patrimoine mondial. Le Comité a pris cette décision, notant « que les effets du changement climatique touchent de nombreux biens du patrimoine mondial et risquent d'en toucher bien davantage, qu'ils soient culturels ou naturels, dans les années à venir ».

Le Comité a demandé au large groupe de travail composé d'experts:

- d'étudier la nature et l'étendue des risques qui pèsent sur les biens du patrimoine mondial et qui sont précisément dus au changement climatique ;
- d'établir en commun une stratégie pour aider les États parties à mettre en œuvre des réactions de gestion adaptées; et
- de préparer un rapport commun intitulé « Prévision et gestion des effets du changement climatique sur le patrimoine mondial » pour examen par le Comité du patrimoine mondial lors de sa 30ème session (Vilnius, 2006).

La réunion d'experts a eu lieu les 16 et 17 mars 2006 au Siège de l'UNESCO à Paris et s'est soldée par la préparation d'un rapport sur l'évaluation et la gestion des effets du changement climatique dans le cadre du patrimoine mondial, ainsi que par une stratégie pour aider les États parties à la Convention concernant la protection du patrimoine mondial culturel et naturel à mettre en œuvre des réactions de gestion adaptées. Une étude de cas a également été publiée par le Centre du patrimoine mondial afin de sensibiliser à cette question (UNESCO, 2008a).

Lors de la Trentième session à Vilnius en juillet 2006, le Comité du patrimoine mondial a révisé ces deux documents et pris la décision de demander aux États parties de mettre en œuvre la stratégie afin de protéger la valeur universelle exceptionnelle, l'intégrité et l'authenticité des sites du Patrimoine mondial des effets néfastes du changement climatique.

Le Comité a également encouragé le Centre du patrimoine mondial, les organisations consultatives et les Etats parties à faire des propositions pour développer et mettre en œuvre des projets pilotes concernant certains biens spécifiques du Patrimoine mondial, notamment dans les pays en développement, afin de définir les meilleures pratiques pour la Stratégie. Par ailleurs, le Comité a demandé au Centre du patrimoine mondial de préparer, par le biais d'un processus consultatif, un document d'orientation relatif à l'impact du changement climatique sur les biens du Patrimoine mondial, qui lui a été présenté lors de la 31e session à Christchurch en 2007 (UNESCO, 2008b).
Ce document d'orientation, élaboré au cours d'une réunion d'experts qui s'est tenue au Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO à Paris en février 2007, traite de la synergie entre les différentes conventions portant sur ce sujet, de l'identification des futurs besoins de recherche, et de l'évaluation du rôle que peut jouer la Convention du patrimoine mondial, sur un plan juridique, pour répondre au changement climatique, des liens entre les organismes internationaux et agences des Nations Unies, y compris le GIEC et les mécanismes alternatifs, autres que l'inscription sur la Liste du patrimoine mondial en péril, pour traiter des problématiques ayant des implications au niveau international, tel que le changement climatique.
La réunion du Comité du patrimoine mondial à Christchurch en juillet 2007 a adopté ce document d'orientation dans sa Décision 31 Com 7.1 2007 (UNESCO, 2008c).

1.2. Commission européenne

Dans le Sixième Programme-cadre pour des activités de recherche, de développement technologique et de démonstration, la Commission européenne a approuvé et financé un projet consacré au changement climatique : *Arche de Noé* («Impact du changement climatique global sur le patrimoine bâti et les paysages culturels », 2004-2007, http://noahsark.isac.cnr.it). Le projet est décrit en § 2.3.

Au moment de la préparation du présent rapport, aucune annonce n'avait été faite concernant le deuxième appel à proposition du Septième programme-cadre, consacré à « Développement et mise en œuvre de méthodes, de techniques, de modèles et d'outils pour évaluer et contrôler les dommages liés aux changements climatiques et s'adapter à leurs impacts (hormis les événements extrêmes). ». Ce programme-cadre, conjointement aux éventuels programmes nationaux tels que le programme Science et patrimoine de l'AHRC/EPSRC au Royaume-Uni, est l'occasion de mener de nouvelles recherches, tant fondamentales qu'appliquées, et d'en intégrer les résultats aux pratiques de gestion.

1.3. Parlement européen

Le 10 septembre 2007, la coordinatrice du projet « Arche de Noé » a été invitée à s'exprimer sur « l'impact du changement climatique global sur le patrimoine bâti et les paysages culturel » devant la Commission temporaire sur le changement climatique du

Parlement européen, lors de la première audience publique consacrée à « l'impact climatique de différents niveaux de réchauffement ».

1.4. Conseil de l'Europe

Le changement climatique est cité parmi les orientations stratégiques par Robert Palmer, Directeur de la culture et du patrimoine culturel et naturel (http://www.coe.int/t/dg4/cultureheritage). Avec le présent rapport, cette Organisation internationale s'attaque directement et spécifiquement aux effets du changement climatique sur le patrimoine culturel. C'est également ce qu'elle a fait dans le passé, mais de manière indirecte, par son implication dans le développement durable. La Convention sur la valeur du patrimoine culturel pour la société, formulée à l'initiative du Conseil de l'Europe à Faro en 2005, en est un exemple.

En 2008, l'intérêt du Conseil de l'Europe pour cette problématique a été relancé par le Secrétaire exécutif de l'Accord européen et méditerranéen sur les risques majeurs qui a organisé une manifestation parallèle intitulée « Le patrimoine culturel et les risques : quelques expériences européennes » dans le cadre de la Conférence internationale sur les catastrophes et les risques qui s'est tenue à Davos, Suisse. A cette occasion, une présentation orale a été consacrée aux « Initiatives actuelles pour évaluer l'impact du changement climatique sur le patrimoine culturel ».

Le Conseil de l'Europe soutient et finance les activités du Centre universitaire européen pour les biens culturels de Ravello, Italie, notamment l'organisation de cours sur les risques posés par le changement climatique au patrimoine culturel (voir §1.7 ci-dessous).

1.5. Centre pour le patrimoine durable (Collège universitaire de Londres)

En 2005, le Centre a publié un rapport de May Cassar, intitulé « *Climate Change and the Historic Environment*"(Cassar, 2005), commandé par English Heritage. Le corps du rapport consistait en une analyse des réponses à un questionnaire qui avait été adressé aux responsables et décideurs britanniques en matière de patrimoine culturel.

Ce premier rapport a été suivi en 2006 d'un autre basé sur des travaux de recherche britanniques et intitulé « *Engineering Historic Futures Stakeholders Dissemination and Scientific Research Report* » (Cassar et Hawkings, 2006).

L'esprit de ces études et bon nombre de leurs conclusions ont été intégrés dans le projet « Arche de Noé », financé par la Commission européenne, dans lequel le Centre a joué un rôle majeur. Il est donc inutile de discuter plus avant ici des premières conclusions. On peut indiquer cependant que le Centre pour le patrimoine durable continue de travailler activement en Europe sur les questions liées au changement climatique et au patrimoine culturel.

1.6. Projet Arche de Noé de l'UE

Ce projet a réuni les principaux laboratoires scientifiques européens engagés dans la recherche sur le patrimoine culturel dans le contexte du changement climatique, une compagnie d'assurance internationale et une entreprise privée spécialisée dans la réparation des dommages causés par des catastrophes environnementales. Les documents scientifiques déjà publiés (Sabbioni et al., 2006; Brimblecombe et al. 2006, 2007; Grossi et Brimblecombe, 2007; Grossi et al. 2007; Blades et al., 2008) et ceux à suivre, rendent compte des résultats de cette étude décisive, la première menée sur cette série de questions. Y ont participé des équipes de recherche engagées depuis plusieurs années dans l'étude de la dégradation du patrimoine culturel due à la pollution atmosphérique et qui ont appliqué leur expérience au changement climatique. Elles ont une excellente connaissance des matériaux, et pour certaines d'entre elles, des phénomènes atmosphériques et climatiques. Il s'agit de :

- *Institut des Sciences de l'Atmosphère et du_ Climat du Conseil national de la recherche* (ISAC-CNR, Bologne, Italie): Cristina Sabbioni (coordinatrice du projet), Alessandra Bonazza, Palmira Messina;
- *Centre pour le patrimoine durable du Collège universitaire de Londres* (UCL, Londres, RU): May Cassar, Phillip Biddulph, Nigel Blades;
- *Université d'East Anglia, Ecole des Sciences environnementales* (UEA, Norwich, RU): Peter Brimblecombe, Carlotta Grossi;
- *Institut de recherche sur la corrosion et les métaux* (KIMAB, Stockholm, Suède): Johan Tidblad;
- *Institut de Catalyse et de Physico-chimie de la Surface, Académie polonaise des sciences* (ICSC, Cracovie, Pologne) : Roman Kozlowski, Lukasz Bratasz, Slawomir Jakiela;
- *Institut de mécanique théorique et appliquée, Académie tchèque des Sciences* (ITAM, Prague, République tchèque): Drdacky, Zuzana Slizkova;
- *Institut des ressources naturelles et d'agrobiologie (IRNAS), Conseil supérieur de la recherche scientifique* (CSIC, Séville, Espagne): Cesareo Saiz-Jimenez, Juan M. Gonzales Grau;
- *L'Institut norvégien de recherche sur l'air* (NILU, Kjeller, Norvège): Terje Grontoft, Gaute Svenningsen;
- *Ecclesiastical Insurance Group* (EIG, Gloucester, RU): Ian Wainwright, Chris Hawkings;
- *Biologia y Medio Ambiente* (BMA, Barcelone, Espagne): Ariño Vila Xavier, Antonio Bolea.

Les participants à ce projet forment ainsi un corps d'experts en matériaux et sciences atmosphériques et climatiques voués à poursuivre leurs investigations sur ces questions dans le cadre de leurs projets de recherche. Leur engagement traduit la volonté des institutions finançant la recherche de s'appuyer sur les connaissances et l'expertise existantes dans ce domaine.

1.7. Centre universitaire européen pour les biens culturels (Ravello, Italie)

Le Centre a décidé de faire du changement climatique et de ses effets sur le patrimoine culturel un de ses principaux axes de travail pour l'avenir. Actuellement, seuls deux cycles de cours ont permis d'aborder ce nouveau problème, et ceci récemment, en 2007 : le cycle sur les risques et celui sur les sciences et les matériaux du patrimoine culturel.

Dans le cycle «*Patrimoine culturel et risques majeurs* », un cours a été dispensé en 2007 sur les risques prévisibles pour le patrimoine culturel dans le contexte du changement climatique et en 2008 l'accent a été placé sur les stratégies de prévention des risques majeurs, y compris le changement climatique.

Les cours du cycle «*Sciences et matériaux du patrimoine culturel* », en 2007, ont été entièrement consacrés au thème « Changement climatique global et patrimoine culturel», en particulier avec la participation de trois éminents intervenants du projet Arche de Noé : Cristina Sabbioni, May Cassar, Milos Drdacky. Cette formation devrait être reconduite en 2009.

2. ANALYSES DU RISQUE

2.1. Méthodologie générale

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du climat (GIEC) a déclaré que les conditions météorologiques actuelles en Europe révèlent des vulnérabilités qui ne peuvent être qu'exacerbées par le changement climatique, notamment au niveau régional. Sur un plan général, le potentiel d'adaptation de l'Europe devrait être relativement élevé en raison des systèmes de soutien politique, institutionnel et technologique bien développés.

- Les ressources en eau et leur gestion sont actuellement soumises à des pressions et ces dernières devraient être accentuées par les changements climatiques
- Les risques d'inondation vont probablement augmenter dans la plus grande partie de l'Europe – sauf là où le pic de fonte de neige a diminué
- La moitié des glaciers alpins d'Europe pourrait disparaître d'ici la fin du XXIème siècle, d'où la nécessité de préparer des opérations de sauvegarde
- Les propriétés du sol vont se détériorer selon des scénarios de climats plus chauds et plus secs en Europe méridionale, menant à une désertification et à une modification de la chimie des sols affectant les sites archéologiques
- Les récoltes de bois diminueront probablement dans les pays méditerranéens, avec des risques croissants de sécheresse et d'incendies
- Certains systèmes de production agricole d'Europe méridionale pourraient être menacés par la pénurie d'eau
- Le secteur des assurances fait face à des effets climatiques potentiellement coûteux liés aux dégâts matériels, mais de nombreuses mesures d'adaptation peuvent être appliquées si l'on réagit rapidement

- La concentration des établissements humains sur les côtes les expose à l'élévation du niveau de la mer et aux événements extrêmes, ce qui nécessitera une protection ou une évacuation
- Les vagues de chaleur vont probablement réduire la demande estivale pour les destinations de vacances en Méditerranée. Les conditions de neige moins fiables auront des effets néfastes sur le tourisme hivernal
- Le risque d'inondation, d'érosion et de perte de terres dans les zones côtières, augmentera nettement, et il aura des conséquences sur les établissements humains, et le tourisme. L'Europe méridionale semble plus vulnérable à ces changements, même si la côte de la Mer du Nord est déjà exposée à des inondations.

Région	**1990 population exposée (millions)**	**Incidences des inondations[1] 1990 Nombre moyen de personnes victimes d'inondation (milliers/an)**	**2080s augmentation due à l'élévation du niveau de la mer, en supposant l'absence d'adaptation (%)**
Côte atlantique	19,0	19	50 à 9000
Côte baltique	1,4	1	0 à 3000
Côte méditerranéenne	4,1	3	260 à 120000

[1] Les estimations de l'incidence des inondations sont très sensibles à la norme de protection supposée et devraient être interprétées à titre indicatif seulement

2.2. Impact des facteurs climatiques sur le patrimoine culturel

Les indicateurs de climat, les facteurs de risque et les effets identifiés sont résumés dans le tableau ci-dessous[1] :

Indicateur de climat	**Risque de modification du climat**	**Effets physiques, sociaux et culturels sur le patrimoine culturel**
Variations de l'humidité atmosphérique	- Inondations (mer, cours d'eau) - Précipitations intenses - Variations du niveau des nappes phréatiques - Modifications de la composition chimique des sols - Modifications des eaux souterraines - Variations des cycles d'humidité - Augmentation à terme de l'humidité - Chlorates de sel marin	- Modification du pH pour les éléments archéologiques enterrés - Perte d'intégrité stratigraphique due au craquage et à la dislocation résultant des variations d'humidité des sédiments - Pertes de données préservées en cas de sol détrempé / anaérobie / anoxie - Eutrophisation accélérant la décomposition microbienne des organismes - Transformations physiques des matériaux de construction poreux et des enduits à cause des remontées d'humidité - Dégâts provoqués par des systèmes d'évacuation d'eau défectueux ou inadéquats ; biens d'eaux pluviales historiques inaptes aux fortes précipitations et souvent difficiles d'accès, pas faciles à entretenir et à ajuster - Cristallisation et dissolution des sels dues aux épisodes d'humidité et de sécheresse qui affectent les structures des

[1] « Principaux risques de modification du climat et leurs effets sur le patrimoine culturel » dans *document d'information UNESCO CENTRE MONDIAL DU PATRIMOINE en coopération avec le gouvernement du Royaume-Uni « Patrimoine mondial et changement climatique » pour la réunion d'experts organisée au Siège de l'UNESCO les 16-17 mars 2006* et dans le Document 30 COM 7.1 préparé pour la 30ème Session du Comité du patrimoine mondial, Vilnius, juillet 2006 consultable sur http://whc.unesco.org/archive/2006/30com-fr.htm

		bâtiments, les vestiges archéologiques, les peintures rupestres, les fresques et autres surfaces peintes - Érosion des matières organiques et inorganiques à cause des eaux de crue - Attaque biologique de matières organiques par des insectes, des moisissures, des champignons, des espèces envahissantes comme les termites - Instabilité du sous-sol, dislocation et affaissement du sol - Cycles d'humidité relative/choc provoquant des fentes, des fissures, des écaillages et de la poussière sur les matériaux et les surfaces - Corrosion des métaux - Autres effets combinés (ex. accroissement de l'humidité associée aux engrais et aux pesticides
Variations de température	- Diurnes ou saisonnières, événements extrêmes (vague de chaleur, accumulation de neige) - Modifications du dégel et des tempêtes de verglas, et gelées plus fréquentes	- Détérioration des façades due au stress thermique - Dégâts provoqués par le gel/dégel - Dommages à l'intérieur de la brique, de la pierre, de la céramique qui ont pris l'humidité et ont gelé à l'intérieur avant de sécher - Dégradation biochimique - Changement «d'aptitude» de certaines structures. Par exemple, le fait de surchauffer des bâtiments peut entraîner des modifications malencontreuses du tissu historique suite à l'introduction de solutions techniques - Adaptation impropre pour permettre aux structures de rester en usage
Élévations du niveau de la mer	- Inondations côtières - intrusion d'eau saline	- Perte/érosion du littoral - Introduction intermittente d'importantes masses d'eau «inconnues» sur le site, ce qui risque de troubler l'équilibre métastable entre les objets et le sol - Submersion permanente des zones en contrebas - Migration de population - Perturbation des communautés - Disparition des rituel et rupture des interactions sociales
Vent	- Pluie apportée par le vent - Sel transporté par le vent - Sable transporté par le vent - Vents, rafales et changements de direction	- Humidité pénétrante dans les matériaux poreux du patrimoine culturel - Charge statique et dynamique des structures historiques ou archéologiques - Dommages structurels et effondrement - Dégradation des surfaces due à l'érosion
Désertification	- Sécheresse - Vagues de chaleur - Baisse de la nappe d'eau	- Érosion - Altération du sel - Impact sur la santé de la population - Abandon et effondrement - Perte de mémoire culturelle
Action combinée du climat et de la pollution	Précipitation de pH - Modification des charges de polluants	- Dessèchement de la pierre par la dissolution des carbonates - Noircissement des matériaux - Corrosion des métaux - Influence de la biocolonialisation
Conséquences climatiques et biologiques	- Prolifération d'espèces envahissantes - Pullulation d'espèces d'insectes connues et nouvelles (ex. termites) - Propagation de moisissures - Modification des colonies de lichens sur les bâtiments - Déclin des matières végétales originales	- Écroulement du bois de soutènement et de couverture - Réduction de la disponibilité d'espèces locales pour la réparation et l'entretien des bâtiments - Modification des valeurs de patrimoine naturel des sites culturels du patrimoine - Modifications de l'aspect des paysages - Transformation des communautés - Modifications des moyens de subsistance des établissements humains traditionnels - Évolution des structures familiales du fait que les moyens de subsistance deviennent plus dispersés et distants

2.3. Projet « Arche de Noé » de l'UE

2.3.1. Approche méthodologique

Des indicateurs climatiques critiques pour le patrimoine culturel bâti ont été sélectionnés et les paramètres climatiques ont été extraits des modèles général (HadCM3) et régional (HadRM3) du Centre météorologique de Hadley au Royaume-Uni. Le maillage du modèle général est de 2,5° x 3,75°, ce qui correspond à 295 x 278 km à 45° de latitude N. Celui du modèle régional est plus fin, 50 km x 50 km (chaque cellule : 0,5° x 0,5° de latitude N).

Le résultat du modèle utilisé reposait sur le scénario A2 (scénarios d'émission du SRES du GIEC utilisés dans le troisième et quatrième rapport d'évaluation). Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité à travers les régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

L'aire géographique choisie est centrée sur l'Europe (c'est-à-dire une région de 33,75°O-67,50°E de longitude et 80°N-25°N de latitude pour le modèle général, et 30°O-55°E de longitude et 72°N-35°N de latitude pour le modèle régional).

Les données de pollution atmosphérique pour des gaz telles que les concentrations de SO_2, HNO_3, O_3 et les pluies acides, ont été traitées pour produire de futurs scénarios. Concernant les futurs niveaux d'émission, deux scénarios ont été développés pour 2020 (en utilisant les jeux de données disponibles pour l'Europe dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (Convention LRTAP), du programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphérique en Europe (EMEP) et pour 2085 (Programme Air pur pour l'Europe (CAFE), scénario de réduction maximale techniquement faisable » - MFTR).

Les moyennes annuelles de concentrations atmosphériques de SO_2, HNO_3 et O_3 et de pluies acides pour les années 1990, 2020 et 2085 sur la région de l'Europe ont été utilisées, avec un maillage de 0,4° x 0,4°.

La paramétrisation des futures variables climatiques repose sur :

- des indicateurs dérivés de la température : les écarts de température, les chocs thermiques, les cycles gel-dégel. Les premiers résultats ont montré une diminution de la fréquence des périodes de gel au cours du XXIème siècle et une réduction du risque de dommages dus au gel, en dehors de l'Arctique et des zones de haute montagne ;
- des indicateurs dérivés de l'eau : le volume des précipitations, le nombre total de jours de pluie, les événements pluviométriques extrêmes, le nombre de jours consécutifs de pluie, l'humidité relative moyenne, l'amplitude des variations d'humidité relative, les chocs d'humidité relative. Les premières conclusions ont particulièrement mis en lumière la sécheresse des mois d'été en Europe centrale ;
- des indicateurs dérivés du vent : la vitesse du vent, les vents très forts, la pluie poussée et orientée par le vent, le sable transporté par le vent ;
- des indicateurs dérivés de la pollution : SO_2, HNO_3, O_3 et précipitations acides.

Les données climatiques dérivées de HadCM3 et HadRM3 ont été converties en paramètres pertinents pour les problèmes affectant le patrimoine culturel. Une attention spéciale a été portée au développement de nouvelles paramétrisations des futures variables

climatiques qui présentent un intérêt particulier pour les matériaux constituant le patrimoine. Ces paramètres sont appelés « paramètres climatiques du patrimoine » et incluent :

- Cycles humidité - gel, à savoir des pluies suivies d'un gel intense
- Indices climatiques de type Scheffer – pour le développement des champignons
- Évaporation – humidité du sol, dessiccation et nappes phréatiques
- Choc thermohygrométrique
- Pluies horizontales dues aux bourrasques – pénétration de l'humidité et redistribution des particules atmosphériques déposées
- Baisse de température et augmentation de l'humidité – sels hydratés

Dans la première phase du projet, il est apparu clairement que les *changements de température n'auront pas d'impact particulièrement critique sur le patrimoine culturel*. Même en cas d'amplification des effets de la température par des cycles gel-dégel, ces effets resteraient très réduits dans la plus grande partie de l'Europe dans le futur. Cependant, *des températures plus élevées pourront affecter des sites archéologiques dans les régions de permafrost***.** Les paramètres hydrométéorologiques semblent s'avérer plus critiques, et il a été noté combien *la recrudescence des fortes précipitations entraînerait une augmentation des inondations et de surcharge des toitures***.** Par ailleurs, les étés secs semblent augmenter l'impact des cycles d'humidité (via la cristallisation des sels), et risquent d'engendrer un assèchement des matériaux de construction non cuits et des sols.

Voici les principaux résultats obtenus :

- Le changement climatique est subtil et intervient sur des périodes très longues. Cependant, certains paramètres climatiques, tels que le gel, les cycles d'humidité et les pluies poussées et orientées par le vent peuvent changer de manière considérable. En particulier, les changements de phase durant les cycles gel-dégel et la cristallisation des sels seront amplifiés, devenant plus sensibles à des fréquences moindres ou accrus en présence de changements climatiques relativement faibles.
- Différentes parties de l' Europe connaîtront des changements climatiques qui affecteront de manière différente leur patrimoine. Ainsi, une profonde modification de la cristallisation des sels interviendra probablement en cas de régime plus sec dans les régions européennes où domine l'architecture médiévale gothique. A l'avenir, l'Ukraine, la Roumanie, l'Autriche, la Hongrie et la Slovénie risquent de connaître davantage de cycles humidité - gel.

2.3.2. Description et prévision de l'impact global du changement climatique sur les structures et matériaux de construction

Le premier objectif était de développer des modèles d'impact des changements climatiques globaux sur la détérioration de divers matériaux formant le patrimoine culturel, incluant des paramètres tant météorologiques que de pollution.

Les modèles ont été adaptés ou développés pour la pierre et les matériaux de maçonnerie, les métaux, le bois et le verre (le verre normalement utilisé pour les vitraux du Moyen Âge). Les modèles incluaient des paramètres météorologiques (température, humidité relative, etc.) et de pollution (SO_2, pluie acide, etc.). Pour les matériaux en pierre, un vaste éventail d'effets a été analysé, y compris la corrosion chimique, la salissure/noircissement, le choc thermique et les cycles gel-dégel. Pour le bois, les dommages mécaniques provoqués par les variations de l'humidité relative ont été analysés, mais également ceux liés à l'attaque biologique de champignons lignivores. Un modèle de pollution par le dioxyde de soufre, lié au changement climatique et à la vitesse du vent, a également été proposé. La pollution par le dioxyde de soufre sera particulièrement active en augmentant la corrosion des métaux et en dégradant les pierres du fait des cycles de cristallisation des sels.

Les modèles étaient de différents types, dont :

- des fonctions de dommages reposant sur des données réelles de terrain tirées de programmes de grande envergure.
- des fonctions de dommages reposant sur une analyse des données de la littérature puis développées aux fins du projet sur la base d'une analyse des effets dominants ;
- des fonctions de dommages reposant sur des recherches initiées en laboratoire dans le cadre du projet.

Au total, l'ensemble des fonctions de dommages élaborées constitue une avancée substantielle de l'état de l'art dans ce domaine.

Le second objectif était d'utiliser les modèles pour évaluer et quantifier les effets des changements climatiques passés et futurs sur d'importants matériaux employés dans les objets du patrimoine culturel selon différents scénarios.

Les modèles développés ont servi à quantifier les effets dans trois périodes : le passé récent (1961-1990), le proche avenir (2010-2039) et l'avenir à plus long terme (2070-2099). Comme indiqué ci-dessus, le scénario A2 a été pris en compte pour les paramètres météorologiques, alors que pour les paramètres de pollution, il a été fait appel à un scénario plus optimiste de réduction et à un scénario plus pessimiste de pollution constante.

S'agissant des matériaux, des *fonctions de dommages* et des *fonctions dose-réponse* ont été utilisées et intégrées aux variations prévues dans les modèles climatiques. La fonction de Lipfert est un exemple de *fonction de dommages* pour l'érosion superficielle des pierres calcaires (Lipfert, 1989). La fonction intègre la solubilité de la calcite, l'intensité et l'acidité des pluies, la vitesse de dépôt et la concentration de SO_2 et de HNO_3 dans l'air. Les *fonctions dose-réponse*, qui relient les quantités de polluants déposées sur un matériau à sa réponse, ont été utilisées pour la corrosion des métaux (acier, zinc, cuivre, bronze,

plomb) et l'altération des vitraux. Ces fonctions ont la propriété essentielle d'être *cartographiables*, de la même manière que les facteurs climatiques.

Le développement d'organismes sur les monuments a fait l'objet d'une attention particulière, à la fois en tant qu'agent de changement esthétique et pour son rôle éventuel dans la détérioration des pierres ou leur protection contre la détérioration. La production de biomasse a été corrélée avec les conditions climatiques, les principaux paramètres définissant le bioclimat étant les précipitations et la température. Les modifications de ces paramètres affectent l'activité des organismes, donc les changements du stock de biomasse.

Des travaux expérimentaux sur des matériaux sensibles aux événements climatiques extrêmes ont été réalisés dans le but principal de déterminer un index du risque climatique pour les matériaux anciens sensibles. Deux matériaux particulièrement sensibles à l'humidité – le bois et les grès argileux – ont fait l'objet d'analyses pour déterminer les modes potentiels de dommage induits par le changement climatique.

Deux mécanismes principaux de dommages causant la détérioration des structures et objets en bois ancien ont été étudiés, et une série de méthodes expérimentales et de simulations numériques par ordinateur ont été appliquées : les dommages mécaniques dus aux variations d'humidité relative et à l'attaque par des champignons lignivores. Le premier s'appliquait tout particulièrement aux objets en bois ancien en place dans les bâtiments, le second aux structures extérieures en bois exposées aux aléas climatiques. Par ailleurs, il a été déterminé que les gonflements et retraits des liants argileux provoqués par les cycles humidité-sécheresse lors de l'exposition extérieure aux précipitations atmosphériques étaient le principal mécanisme de détérioration des matériaux contenant de l'argile.

En vue de formuler un index de risque pour le bois d'intérieur, une modélisation numérique a été utilisée pour relever l'évolution du gradient de teneur en humidité et le champ de contrainte résultant de la réaction dimensionnelle et différentielle (restreinte) dans des cylindres de bois simulant des sculptures, en réaction à des variations de température et d'humidité relative (HR). Les propriétés du tilleul en tant que matériau ont été utilisées dans la modélisation, ce bois étant largement utilisé au plan historique. Les variations HR admissibles, en-dessous desquelles les dommages matériels n'ont pas lieu, ont été dérivées sous forme de fonctions d'amplitude, de période de temps et de niveau HR de départ au moment de la variation. Le risque de dommage mécanique induit par l'environnement et causé au bois a été décrit sous la forme d'un nombre annuel de variation HR dépassant 30% entre deux jours consécutifs, car de telles variations se sont avérées potentiellement fort dommageables selon les résultats de la modélisation effectuée.

Un index amélioré du risque climatique lié aux attaques de champignons a également été développé. Le transfert d'humidité dans le bois a été déterminé au moyen d'une technique d'imagerie par résonance magnétique nucléaire *(*IRM*)*. Un modèle d'infiltration à deux niveaux, un transfert très rapide par les pores, accompagné d'une infiltration simultanée plus lente dans les matériaux avoisinants plus denses, a été utilisé pour interpréter les résultats. Les profils de pénétration de l'humidité dans le bois ont ainsi pu être simulés numériquement pour tous les événements pluviométriques. Après les modèles de développement des champignons, des profils de pénétration de l'humidité ont pu être

recalculés en « événements présentant un risque de croissance fongique », qui ont ensuite été agglomérés en période de risque de croissance fongique à l'échelle du trimestre. L'effet de la température a également été pris en compte.

Le suivi des émissions acoustiques (EA) a été employé pour analyser le traçage des dommages matériels sur le grès de Salamanque en Espagne – un matériau contenant de l'argile – en raison du changement dimensionnel restreint en réaction à des cycles humidité-sécheresse. Les EA, définies comme une énergie libérée suite à la microfissuration de la structure de la pierre, ont été enregistrées pour chaque période d'humidité et de sécheresse et mises en rapport avec l'énergie totale correspondant à la destruction mécanique du spécimen. De cette manière, le pourcentage de dommage total pour chaque cycle a pu être établi et par voie de conséquence le nombre critique de cycles engendrant un dommage sérieux du matériau a été analysé – il est de 10 cycles pour le grès de Salamanque. Reposant sur le développement des dommages ainsi déterminé et l'infiltration d'eau dans le grès qui a été modélisée, l'index du risque des dommages induits par le climat a été défini : il s'agit de l'épaisseur de la couche externe de la pierre pour laquelle le nombre de cycles humidification-séchage était supérieur à 10 durant un intervalle de temps donné (un trimestre dans ces calculs), et où la température ambiante était simultanément supérieure à 0 °C.

2.3.3. Stratégies d'atténuation et d'adaptation aux effets du changement climatique

Le développement de stratégies et de mesures visant à atténuer ou à s'adapter aux effets du changement climatique global sur le patrimoine culturel bâti est axé sur les dommages structurels et ceux liés à la sécheresse.

Concernant les dommages structurels, des analyses ont été menées sur les données climatiques enregistrées, ainsi que sur les dommages et les défaillances qui sont intervenus suite à des conditions climatiques désastreuses. Par la suite, les éléments, objets et sites du patrimoine culturel ont été classés en cinq catégories de sensibilité, dans le cadre de quatre groupes de risques climatiques : l'action météorologique, les inondations, les glissements de terrain et les vents. De plus, une base de données de références scientifiques sur les dommages mécaniques et les défaillances des structures anciennes en raison des effets météorologiques a été créée, et des mesures et stratégies d'adaptation pertinentes suggérées.

L'impact de l'action du vent sur les structures anciennes et les objets d'art a été développé selon deux axes parallèles. Plusieurs formes typiques de structures et de toits anciens ont été sélectionnées, la plupart provenant de tours de vieilles villes. Le modèle tridimensionnel qui a été développé permet d'analyser les situations complexes, et a été validé et calibré sur la base de tests sur des modèles à échelle réduite en soufflerie. Cette méthodologie innovante et l'application d'une analyse hybride des flux d'air autour des formes architecturales complexes des anciennes tours est une approche véritablement pionnière dans ce domaine.

Les glissements de terrain et les inondations dus aux fortes précipitations ont été étudiés dans un deuxième temps. Une carte des principaux événements de glissement de terrain, actifs ou stabilisés, a été compilée à l'échelle de la République tchèque. Combinée avec des informations sur la composition géologique, elle a permis l'identification des matériaux qui sont le plus prédisposés aux déformations dues aux glissements de terrain.

Une analyse du déroulement de plusieurs événements importants, au cours desquels des bâtiments de valeur historique ont subi des dommages suite à un glissement de terrain, a été menée, révélant que les matériaux les plus problématiques étaient ceux à grain fin, l'argile et les pierres argileuses. D'autres recherches ont porté sur le développement de modèles mathématiques constitutifs de matériaux pour les sols à grain fin. Un progrès notable a été réalisé dans le développement de modèles reposant sur la théorie de l'hypoplasticité. Pour l'évaluation du risque et les mesures d'adaptation, une étude approfondie des méthodes existantes d'identification et de protection des zones propices aux glissements de terrain a été menée. Cette partie du projet s'est traduite par plusieurs études théoriques d'importance fondamentale pour leur contribution à une théorie plus générale et à la modélisation numérique des sols (Drdacky et al., 2007).

Pour analyser les stratégies d'adaptation à la sécheresse, une étude de cas a été menée sur l'Église de l'Archange Saint Michel à Dębno, dans le Sud de la Pologne, afin de comprendre les effets du climat sur les matériaux composant l'édifice. Elle a permis de valider un nouveau modèle de transfert de chaleur et d'humidité (HAMT), pour simuler la réaction d'un matériau de construction aux changements de température et d'humidité relative. Le modèle a été utilisé pour analyser l'impact du changement climatique sur l'humidité contenue dans les matériaux de construction et les effets de diverses stratégies d'assèchement. Ce modèle HAMT a été validé au plan international et accepté en tant que sous-modèle du logiciel EnergyPlus©, largement répandu.

Les méthodologies adoptées supposaient de recourir à des données et des logiciels existants afin d'élaborer un modèle logiciel vérifié d'un bâtiment du patrimoine culturel. L'approche consistait à appliquer le modèle ainsi développé pour comprendre les effets du changement climatique sur ce bâtiment et appréhender ainsi les contributions internes et externes ayant une incidence sur l'humidité des structures du bâtiment. Les simulations ont permis de dresser un bilan du comportement des matériaux dans diverses conditions. La recherche en matière de stratégies d'assèchement a notamment eu des implications sur les méthodes actuelles employées à cet effet sur les bâtiments (qu'ils aient une importance culturelle ou non). Le bois est particulièrement sensible aux techniques d'assèchement rapide. Cette recherche a montré que le système utilisant une ventilation naturelle complétée par une légère déshumidification mécanique contrôlée est le plus rapide et réduit le risque de stress mécanique et d'attaque biologique.

2.3.4. Diffusion des informations sur les effets du changement climatique et stratégies d'adaptation pour le patrimoine bâti et les paysages culturels

Pour chaque paramètre climatique choisi, des cartes de valeurs moyennes sur des périodes de 30 ans ont été développées selon le modèle climatique général (HadCM3). Ce sont elles qui présentent le plus d'intérêt sur le plan climatologique. Elles ont été produites pour le passé récent (1961-1990), le proche avenir (2010-2030) et l'avenir à plus long terme (2070-2099), et montrent l'évolution des scénarios d'un paramètre particulier.

De plus, des cartes différentielles entre l'avenir à plus long terme et le proche avenir, et entre le proche avenir et le passé récent ont été produites afin de mieux quantifier les changements eu égard au scénario présent.

Les valeurs d'avenir à plus long terme du modèle régional (HadRM3) ont également été tracées avec une résolution supérieure. L'avenir à plus long terme est déterminant pour

l'analyse du climat, car on estime que les changements les plus significatifs interviendront au cours de cette période.

Les matériaux suivants ont été sélectionnés : le marbre, le calcaire compact, le grès, la brique, les métaux ferreux, le bronze, le zinc, le cuivre, le plomb, le bois et le verre.

Un Atlas de la vulnérabilité a été réalisé, regroupant les divers types de cartes et les conclusions des recherches sur les scénarios du futur, établissant un lien entre la climatologie et les dommages susceptibles d'être causés au patrimoine culturel. Il comprend les sections suivantes :

- *Les cartes climatiques* : le changement climatique est cartographié sur la base des paramètres climatiques traditionnels présentant un intérêt pour le patrimoine culturel (précipitations annuelles, gel). Elles forment la base des autres types de carte et interviennent dans leur élaboration.
- *Les cartes climatiques du patrimoine* : elles sont obtenues en combinant les paramètres climatiques de façon à définir les circonstances réputées importantes dans la dégradation du patrimoine culturel (par exemple la cristallisation des sels obtenue lors des événements survenant par année de cycles d'humidité relative = 75,5%).
- *Les cartes des dommages* : il s'agit d'une étape supplémentaire dans l'emploi des paramètres climatiques. Elles reposent sur les fonctions de dommages, qui expriment quantitativement les dommages induits par les paramètres climatiques aux matériaux de construction dans les scénarios du futur (par ex. l'érosion superficielle du calcaire, la corrosion des métaux).
- *Les cartes des risques et des risques multiples* : elles montrent les zones présentant des risques accrus/réduits pour un (carte des risques) ou plusieurs (carte des risques multiples) processus de détérioration de matériaux dans diverses régions d'Europe. Elles résument les cartes précédentes et ont pour objectif d'informer les décideurs des types de risques susceptibles de prévaloir dans une région particulière.
- *Les pages thématiques* : elles ont été utilisées dans les cas où la production de cartes était impossible et où une méthode de remplacement était indispensable pour analyser le changement futur concernant un type particulier de dommage (par exemple, dans le cas des salissures, lorsque les processus locaux sont étroitement liés à des bâtiments spécifiques). Elles résument les résultats obtenus sur des typologies des dommages spécifiques et appliquent la climatologie dans le contexte du patrimoine culturel européen.

L'activité de recherche ainsi menée a permis de mettre en lumière l'importance considérable de l'eau, véritable menace pour le patrimoine. Bien que la température soit souvent considérée comme l'agent le plus reconnaissable du changement climatique, l'eau paraît être le facteur déterminant si l'on analyse les monuments européens. Il peut s'agir de l'eau déversée lors des périodes de fortes précipitations, des inondations ou des tempêtes. D'une manière plus subtile et encore plus envahissante, on peut envisager que des précipitations plus intenses provoquent la surcharge des toitures, le débordement des gouttières, infiltrent les matériaux traditionnels, ou déposent des polluants sur les bâtiments. L'eau intervient également dans le changement d'humidité qui affecte le développement de micro-organismes sur la pierre et le bois, et dans la formation de sels qui dégradent les surfaces et participent à la corrosion.

Des précipitations plus importantes en Europe entraîneront une infiltration accrue de l'eau (notamment dans les matériaux architecturaux locaux tels que les briques non cuites ou les toits de chaume) et des ruissellements. Cependant, des étés plus secs risquent avant tout de

renforcer l'action des sels sur la pierre, le mortier, les fresques et les peintures murales et la dessiccation des sols qui protègent les vestiges archéologiques et soutiennent les fondations des bâtiments et des monuments.

De plus, des résultats plus spécifiques ayant trait aux différents processus de dommage analysés peuvent être avancés :

- L'érosion superficielle des pierres calcaires, telles que le marbre ou le calcaire compact, devrait augmenter en Europe du Nord et atteindre des valeurs de 35 μm/a.
- Les cycles annuels d'humidité relative autour de 75,5%, avec pour conséquence une augmentation des événements de cristallisation des sels, seront probablement plus fréquents en Europe, et mettront en danger les matériaux poreux tels que le calcaire poreux, le grès et la brique.
- Une augmentation de la corrosion des métaux ferreux et du bronze dans les zones urbaines du Nord de l'Europe est prévue. La tendance est principalement liée à la température annuelle moyenne, sachant que la corrosion maximale est observée à 10°C.
- La corrosion du zinc devrait augmenter dans les régions européennes touchées par des dépôts de chlorures.
- La réduction de la lixiviation des vitraux en Europe devant être minime, les vitraux moyenâgeux continueront donc d'être menacés dans beaucoup de régions.
- Le Bassin méditerranéen continuera en général de connaître le plus fort risque de thermoclastie.
- L'Europe en général connaîtra une diminution des dommages par le gel (pierres poreux), sauf dans les zones montagneuses et les régions du Nord.
- La dégradation par les champignons lignivores intervient dans un climat chaud et en présence de fortes précipitations. Comme le Nord et l'Est de l'Europe devraient subir dans le futur une augmentation de la température accompagnée de fortes précipitations, il conviendra de porter une attention accrue à la protection des structures en bois contre les effets des eaux de pluie.
- Les grès contenant de l'argile connaîtront dans le futur plus de 10 cycles à une profondeur de plusieurs centimètres dans le Nord de l'Europe et les zones montagneuses, principalement en raison des fortes précipitations. Les régions plus sèches – l'Espagne, l'Italie, la Turquie et l'Afrique du Nord – seront moins exposées.

Des lignes directrices proposant des stratégies d'adaptation de la gestion du patrimoine culturel face au changement climatique ont également été produites, principalement dans le but d'aider toutes les parties prenantes à la protection du patrimoine, propriétaires et conservateurs de collections et de bâtiments anciens, responsables politiques et organisations nationales du patrimoine, à s'adapter aux pressions du futur changement climatique.

La compilation d'un ensemble complet de lignes directrices pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique représente l'état de l'art dans ce domaine. L'approche consistait à utiliser les résultats de la recherche et l'expérience accrue des auteurs pour offrir des stratégies réalistes et efficaces permettant de faire face aux conséquences les plus probables du changement climatique sur le patrimoine culturel.

3. EVOLUTION FUTURE

Le point d'orgue des délibérations du Comité du patrimoine mondial de l'UNESCO sur le changement climatique et le patrimoine culturel a été la décision (WHC-07/31.COM/7.1) prise lors de sa 31e session à Christchurch, Nouvelle Zélande, entre le 23 juin et le 2 juillet 2007. Lors de cette réunion, les questions liées à l'état de conservation des biens du patrimoine mondial concernant les effets du changement climatique ont été discutées et les priorités de recherche suivantes ont été convenues en ce qui concerne le patrimoine culturel :

• Comprendre la vulnérabilité des matériaux (intérieurs, extérieurs, enterrés) aux variables climatiques (par exemple, les effets dus à un excès ou à un manque d'humidité).

• Comprendre comment il convient d'adapter les pratiques et les matériaux traditionnels à des événements météorologiques extrêmes et à un changement de climat.

• Mettre au point des techniques et des méthodes à sûreté intégrée pour contrôler l'impact du changement climatique sur les biens.

• Comprendre les effets du changement climatique qui sont à l'origine de transformations sociales, qu'il s'agisse de mouvements de populations, de déplacements de communautés, de leurs pratiques et de leur relation avec leur patrimoine.

Les futurs besoins de la recherche dans le domaine du changement climatique et du patrimoine culturel mondial se résument en cinq thèmes:

• Compréhension de la vulnérabilité des matériaux
• Évolution du suivi
• Modélisation et projection de l'action du climat
• Gestion du patrimoine culturel
• Prévention des dommages

3.1. Recherche scientifique fondamentale

Plusieurs domaines sont à explorer au niveau de la recherche fondamentale pour créer les fondements d'une climatologie appliquée à la protection du patrimoine culturel.

Une des priorités de la recherche fondamentale dans le domaine du patrimoine culturel est la détermination scientifique des paramètres climatiques les plus critiques pour les bâtiments, les collections et les sites composant ce patrimoine.

Il existe plusieurs modèles climatiques qu'il s'agit de tester et de valider pour en prédire les effets sur le patrimoine culturel. Par ailleurs, il convient de définir la marge d'erreur de ces modèles des effets futurs du climat sur les bâtiments, les collections et les sites du patrimoine culturel. L'application des modèles existants soulève des problèmes

particuliers car ils supposent la fixation d'échelles spatiale ou temporelle. En dépit de l'amélioration de la résolution spatiale des modèles au cours des dernières années, il n'en va pas toujours de même des échelles temporelles, la recherche sur le patrimoine ayant souvent besoin de données à la journée ou à l'heure, voire d'une résolution encore plus précise.

Il est essentiel de développer et de tester des fonctions de dommages pour une vaste palette de matériaux du patrimoine pour les climats passés, présents et futurs, dans des environnements tant intérieurs qu'extérieurs.

Il est urgent pour l'Europe d'explorer l'incidence de l'élévation du niveau de la mer sur la protection du patrimoine culturel.

3.2. Recherche appliquée

Pour faire prendre conscience aux gestionnaires du patrimoine culturel de l'importance de la science sous-jacente dans la prise de décision, il est essentiel d'analyser les effets sur un groupe de sites et d'ensembles les plus significatifs du patrimoine mondial afin de soutenir la formulation de stratégies de conservation préventives.

Les problèmes liés aux effets du changement climatique et la modélisation de ces effets sur le patrimoine culturel dans les environnements intérieurs doivent être érigés en priorités.

L'évolution de l'état du patrimoine culturel soumis à des inondations à court, moyen et long terme doit être mesurée. Des orientations sur l'incidence de l'élévation du niveau de la mer doivent être développées à l'attention des gestionnaires du patrimoine.

Il convient d'élaborer des stratégies d'adaptation reposant sur des actions précoces et peu onéreuses, avec un juste équilibre entre limitation des dommages, contrôle de l'environnement et consommation d'énergie.

Une bonne politique, une formation efficace et des pratiques durables doivent toutes reposer sur une recherche scientifique d'excellence.

4. RECOMMANDATION

Ces recommandations portent aussi bien sur la recherche, que la gestion, la politique et l'éducation.

4.1 Recherche

4.1.1. Financement

Les spécificités de la recherche sur le climat et le patrimoine culturel qui couvre un large éventail de matériaux vulnérables et vieillissants, l'exploitation extensive à des fins de

tourisme culturel et les profits financiers qui vont de pair, la fragilité et l'isolement, le déséquilibre entre la pléthore de sites et le nombre restreint de gestionnaires et de scientifiques de la conservation, nécessitent des efforts concertés particuliers pour la recherche dans ce domaine.

Lors de sa 30e Session (Vilnius 2006, Décision 30 COM 7.1), le Comité du patrimoine mondial a demandé à tous les États parties de protéger les valeurs universelles exceptionnelles, l'intégrité et l'authenticité des biens du patrimoine mondial contre les effets préjudiciables de l'évolution du climat. Pour satisfaire cette exigence, certaines lacunes de la recherche ont été identifiées dans le document d'orientation WHC-07/16.GA/10 adopté par la 16e Assemblée Générale des États Parties à *la Convention sur le Patrimoine mondial* (octobre 2007) et décrites dans le document d'orientation de l'UNESCO sur « l'impact du changement climatique sur les biens du patrimoine mondial » (2008, CLT-2008/WS/6, page 11, Annexe 1, Priorités de recherche spécifiques) : *compréhension de la vulnérabilité des matériaux ; évolution du suivi ; modélisation et projection de l'action du climat ; gestion du patrimoine culturel ; prévention des dommages*.

4.1.2 Coopération et compétitivité

L'Europe fut la première à créer ce nouveau secteur de recherche qui associe la recherche scientifique sur le changement climatique au patrimoine culturel. Pour maintenir ce leadership, la coopération au plan européen est essentielle pour encourager et renforcer la compétitivité de l'Europe en la matière au niveau international.

La coopération s'avère également vitale pour prévenir la duplication des actions et renforcer les complémentarités et les synergies tant en termes de recherche *fondamentale* qui suppose de réunir un volume considérable de données, que de recherche *appliquée* qui nécessite l'identification de stratégies communes d'atténuation et d'adaptation.

4.1.3 Masse critique

En raison du caractère novateur et exigeant de ce secteur, seuls quelques scientifiques travaillent sur le changement climatique et ses répercussions sur le patrimoine culturel. Les trois groupes existants sont tous implantés en Europe. Pour le développement futur de la recherche, il est primordial que les projets et programmes soient conçus au niveau européen afin de préserver la masse critique nécessaire, mais aussi pour exploiter les données essentielles qui ont commencé à être recueillies à cette échelle. La poursuite des investissements est un élément vital du développement de la masse critique. La notion d'éparpillement des ressources paraît juste à première vue alors qu'elle est en fait contre-productive.

4.2 Politique

La recherche doit se traduire en action politique, les différences entre les pays étant gommées grâce à la coopération internationale et au transfert de connaissances afin d'éviter le recours à des stratégies ou expériences inappropriées. Les États ayant fait

l'expérience des effets d'un certain type de changement climatique sur le patrimoine culturel pourraient ainsi partager leurs connaissances avec ceux nouvellement touchés par des conditions similaires.

4.2.1 Niveau mondial

L'inclusion des scénarios en cours dans les futurs rapports du GIEC et autres documents internationaux (par exemple la CCNUCC) est un élément essentiel.

- La coopération internationale, en particulier avec les pays en développement (tels que la Chine et l'Inde), voisins (par ex. pays candidats, région méditerranéenne) et industrialisés (par ex. USA et Japon) doit être instaurée.

4.2.2 Niveau européen

Pour l'Europe, il est nécessaire d'envisager :

- L'inclusion du patrimoine culturel aux priorités législatives et politiques actuelles et à venir.
- La diffusion des connaissances et une sensibilisation à l'impact du changement climatique sur notre patrimoine auprès des autorités nationales, régionales et locales, du secteur privé (par ex. celui de l'assurance) et des citoyens.

4.3 Formation

4.3.1. Renforcement des capacités scientifiques

Le grand public, et particulièrement les jeunes, sont parfaitement conscients des problèmes du changement climatique, suite notamment aux récents événements extrêmes (tempêtes, cyclones et tornades, inondations, canicules, avalanches et glissements de terrain), qui ont bénéficié d'une large couverture médiatique. Malgré cela, on constate une sensibilisation moindre à la nature spécifique des risques qui menacent le patrimoine culturel. Cet état de fait se reflète également dans la formation des futurs conservateurs, restaurateurs et chercheurs dans ce domaine et par la réticence persistante à enseigner les sciences physiques et chimiques indispensables à ceux qui ont bénéficié d'une formation artistique. Il est par conséquent urgent d'introduire un enseignement spécifique sur les problèmes posés au patrimoine culturel par le changement climatique dans les programmes universitaires et dans ceux des écoles dispensant une formation spécialisée aux professions concernées, notamment les architectes, ingénieurs, conservateurs et restaurateurs en charge des monuments historiques.

Ainsi, la mise en place de cours de formation avancée périodiques ou permanents pourrait être l'une des actions spécifiques du Conseil de l'Europe, parallèlement à ceux proposés par la Commission européenne, plus axés sur la recherche scientifique.

Le Conseil de l'Europe pourrait, en tant qu'autre action stimulante, créer un prix dédié à la protection du patrimoine culturel contre le changement climatique.

4.3.2 Transfert des connaissances à la pratique

Il convient d'accroître le transfert des connaissances car les praticiens doivent être en mesure de traduire dans la pratique les résultats de la recherche avec l'aide de protocoles et de directives. Le patrimoine culturel n'est ni préparé ni adapté au climat de demain. Il nous faut des informations sur la manière de renforcer sa résistance aux catastrophes futures et d'en réchapper.

Quelques canaux de diffusion de ce type de connaissances existent déjà ainsi qu'un petit nombre de journaux spécialisés en la matière, mais ils restent peu lus par les praticiens. Il est donc particulièrement nécessaire de développer de nouveaux modes de transfert des connaissances aux praticiens.

Davantage de spécialistes sont requis aux fins de faciliter l'atténuation des effets climatiques et d'expliquer les stratégies d'adaptation au changement de climat. Ils sont également nécessaires pour étendre les procédures de gestion appropriées aux monuments historiques, aux sites archéologiques, aux paysages et jardins. Dans l'avenir, ces procédures doivent devenir routines.

5. REFERENCES

Blades, N., Cassar, M., Biddulph. P., 2008: Optimizing Dying Strategies to reduce Down Times for Actively-used Flood Damaged Historic Buildings. In: Saunders, D, Townsend, J.H, and Woodcock, S, editors. *Conservation and Access Contributions to the IIC London Congress*, 15-19 septembre 2008

Brimblecombe P., Grossi C.M., Harris I., 2006: Climate change critical to cultural heritage. *in*: Fort R, Álvarez de Buergo, M, Gómez-Heras C, Vázquez-Calvo C, editors. *Heritage, Weathering and Conservation.* Balkema, Rotterdam, 387-393.

Brimblecombe, P., Grossi C. M., Harris I., 2007: Future trends in surface wetness and relative humidity and potential impact on materials, *Pollution Atmosphérique*, n° spécial « Effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux », 95-100.

Cassar, M., 2005: Climate Change and the Historic Environment. *Collège Universitaire de Londres, Centre pour le patrimoine durable*, 98 p.
http://eprints.ucl.ac.uk/archive/00002082/01/Published_Climate_Change_Report_05.pdf

Cassar, M., Hawkings, C., 2006: Engineering Historic Futures Stakeholders Dissemination and Scientific Research Report, *Collège Universitaire de Londres, Centre pour le patrimoine durable*, 158 p.
http://www.ucl.ac.uk/sustainableheritage/ehf_report_web.pdf

Grossi, C.M., Brimblecombe, P., 2007: Effect of long-term changes in air pollution and climate on the decay and blackening of European stone buildings, in *Building Stone Decay: from Diagnosis to Conservation*, Prikryl, R; & Smith, B. (eds), Société Géologique de Londres, Publications spéciales, 271, 117-130.

Grossi, C. M., Brimblecombe P., Harris, I., 2007: Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate, *Science of the Total Environment*, 377, 273-281.

GIEC: *Climate Change Assessment Reports:* 1 (1990), 2 (1995), 3 (2001), 4 (2007) http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm

Lipfert, F.W., 1989: Atmospheric Damage to Calcareous Stones. Comparison and reconciliation of recent experimental findings, *Atmospheric Environment*, 23, 415-429.

Drdacky, M., Binda, L., Herle, I., Lanza, L.G. Maxwell, I., Pospisil, S. : 2007 : Protection du patrimoine culturel face aux catastrophes naturelles , Parlement européen, Direction générale des politiques internes de l'Union, Département thématique Politiques structurelles et de Cohésion PE 369.029

Noah's Ark, 2004-2007: *Global Climate Change Impact on Built Heritage and Cultural Landscapes*, Projet de la Commission européenne n° SSPI-CT-2003-501837. http://noahsark.isac.cnr.it.

Noah's Ark, 2007: *Global Climate Change Impact on Built Heritage and Cultural Landscapes, Vulnerability Atlas* (124 p.) *and Guidelines* (87 p.), Noah's Ark Project Final Int. Meeting, Rome, non publié. http://noahsark.isac.cnr.it/deliverables.php

Sabbioni, C., Cassar, M., Brimblecombe, P., Tidblad, J., Kozlowski, R., Drdacky, M., Saiz-Jimenez, C., Grontoft, T., Wainwright, I., Arino, X., 2006: Global climate change impact on built heritage and cultural landscapes, in *Heritage, Weathering and Conservation*, Fort, Alvarez de Buergo, Gomez-Heras & Vazquez-Calvo (eds), Taylor and Francis Group, Londres, 395-401.

UNESCO, 2007: Changement climatique et patrimoine mondial, *Centre du Patrimoine Mondial*, Paris, Rapport n° 22, WHC-06/30.COM/7.1, 55 p. http://whc.unesco.org/en/climatechange/

UNESCO, 2008a: Études de cas sur les changements climatiques et le patrimoine mondial, *Centre du patrimoine mondial*, CLT-2008/WS/6, Paris. http://whc.unesco.org/fr/autresmateriaux/CLT/WHC/07/30

- **UNESCO**, 2008b: : Effets du changement climatique sur les biens du patrimoine mondial, *Centre du patrimoine mondial*, WHC-06/30.COM/7.1, p. 26, http://whc.unesco.org/en/climatechange/

- **UNESCO**, 2008c: Document d'orientation sur l'impact du changement climatique sur les biens du patrimoine mondial *Centre du patrimoine mondial*, CLT-2008/WS/6, Paris,32p. http://whc.unesco.org/en/climatechange/