

# LE PATRIMOINE MONUMENTAL FRANÇAIS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL

Un aperçu pour les conservateurs, restaurateurs, architectes, décideurs,  
chercheurs et enseignants

**R.-A. LEFEVRE**

Professeur émérite à l'Université Paris-Est Créteil  
Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques  
Unité Mixte de Recherches CNRS 7583

[roger.lefevre@lisa.ipsl.fr](mailto:roger.lefevre@lisa.ipsl.fr)

<http://openarchive.icomos.org/id/eprint/2364/>



*Le château de Chambord, en Val de Loire, classé au Patrimoine de l'Humanité par l'Unesco, avant et lors de l'inondation de juin 2016 provoquée par une crue exceptionnelle du Cosson*

*Juillet 2021*



## SOMMAIRE

RESUME, ABSTRACT.....	p. 4
INTRODUCTION.....	5
<i>1<sup>ère</sup> Partie : Généralités sur le changement climatique dans ses rapports avec le patrimoine culturel.....</i>	
- Le patrimoine culturel français face au changement climatique : une histoire récente encore largement à écrire ... Les textes et travaux scientifiques fondateurs .....	11
- Les modèles et scénarios du changement climatique global.....	14
- Quel futur climat pour le patrimoine en Europe ?.....	19
- Quel climat pour le patrimoine culturel français à la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle ?.....	22
- Evènements lents et évènements extrêmes.....	27
- La contribution du patrimoine culturel à la résilience des villes.....	28
- Prévoir et quantifier l'évolution des matériaux : les Fonctions Dose-Réponse ou Fonctions de Dommage.....	31
- Un résumé du vocabulaire du patrimoine culturel face au changement climatique.....	33
<i>2<sup>ème</sup> Partie : Les impacts du changement climatique sur le patrimoine culturel français et son adaptation...35</i>	
- <i>Tableau 1</i> : Impacts prévisibles du changement climatique sur les <i>façades</i> des monuments et édifices en France .....	37
- <i>Tableau 2</i> : Impacts prévisibles du changement climatique sur l' <i>intérieur</i> des édifices, musées, collections, bibliothèques, archives, réserves en France .....	40
<i>3<sup>ème</sup> Partie : Les études des phénomènes affectant le patrimoine culturel français dans le cadre du changement climatique.....</i>	
- Les façades monumentales en pierre face à la pollution de l'air et au dérèglement climatique.....	45
- Les vitraux anciens face à la pollution de l'air et de la pluie, et au changement climatique.....	51
- Les métaux du patrimoine culturel dans le changement climatique.....	77
- La dégradation des murs par les eaux chargées de sels et le changement climatique.....	55
- Les monuments et sites français menacés par les crues et les étiages des fleuves.....	60
- Les monuments et sites archéologiques français menacés par la montée des eaux marines.....	66
- La contribution du patrimoine culturel à l'histoire passée et récente du climat en France : documents écrits, relevés météorologiques anciens et dendroclimatologie.....	71
<i>4<sup>ème</sup> Partie : Les impacts du changement climatique sur le patrimoine culturel à aborder en France.....75</i>	
- Les effets du gel-dégel sur les matériaux du patrimoine culturel .....	80
- Le climat intérieur des musées, des bibliothèques, des collections.....	82
- La stabilité des édifices monumentaux sur sols argileux en France.....	86
<i>Synthèse des impacts potentiels du changement climatique sur le patrimoine culturel français et les maladaptations à éviter.....</i>	
	89
<i>Conclusion générale : Vers une stratégie française d'adaptation du patrimoine culturel aux impacts du changement climatique.....</i>	
	91
<i>Postface : Remerciements.....</i>	
	95

## RESUME

Le patrimoine monumental français n'a fait à ce jour l'objet que de peu de recherches concernant son comportement face au dérèglement climatique en cours sur notre planète. L'évolution des phénomènes consécutifs à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre et pouvant avoir des conséquences pour le patrimoine culturel matériel est d'abord décrite : *température, humidité, précipitations, niveau des océans*.

Leurs impacts prévisibles sur le patrimoine monumental sont résumés dans deux grands tableaux, en distinguant les événements à survenue *lente* de ceux qui ont une survenue *rapide* et violente en situation extrême.

Les résultats obtenus par les chercheurs français qui se sont investis dans cette problématique, ainsi que d'autres extrapolés de recherches à l'échelle européenne, sont présentés, en particulier ceux qui concernent *les façades en pierre des monuments, les vitraux anciens, le comportement prévisible des métaux, la cristallisation des sels dans les murs poreux, les crues fluviales et les étiages, les sites archéologiques côtiers, les études dendroclimatologiques*. En revanche, des sujets importants n'ont pas été abordés sur le patrimoine français : *les effets du gel-dégel sur les matériaux poreux, la stabilité des édifices sur sols argileux, le climat intérieur des musées, des bibliothèques et des collections qu'ils abritent, l'empreinte carbone du patrimoine monumental français*.

Une stratégie française d'adaptation aux impacts du changement climatique sur le patrimoine culturel matériel concernant la recherche fondamentale et appliquée, l'enseignement et la formation, les financements et l'économie, est suggérée en conclusion.

## ABSTRACT

The French Cultural Heritage has so far been the subject of little research concerning its future behaviour towards the current climate change on our planet. The evolution of phenomena resulting from the increase in greenhouse gases emissions in the Earth atmosphere and which can have consequences for the tangible cultural heritage is first described: *temperature, humidity, precipitation, ocean level*.

Their foreseeable impacts on the cultural heritage are summarized in two main tables, distinguishing between events with *slow onset* and those with *rapid and violent onset* in extreme situations.

The results obtained by French researchers who have invested in this issue, as well as other extrapolated research on a European scale, are presented, in particular those concerning *the facades of monuments in stone, the old stained glass windows, the predictable behaviour of metals, the crystallization of salts in porous walls, the river floods and low water, the coastal archaeological sites, the studies of dendroclimatology*. On the other hand, important subjects have not been discussed on French heritage: *the effects of freeze-thaw on porous materials, the stability of buildings on clay soils, the indoor climate of museums, libraries and the collections they house, the carbon footprint of French cultural heritage*.

A French strategy for adapting to the impacts of climate change on tangible cultural heritage concerning basic and applied research, education and training, the funding and the economy is suggested in conclusion.

## INTRODUCTION

Il n'est guère contesté, en 2021, que le changement du climat de la Terre ou, pour dire mieux, son dérèglement, soit réel et que certains *événements climatiques extrêmes* (vagues de chaleur, pluies intenses ou sécheresses selon les régions, érosions et submersions marines côtières...) aient été plus nombreux et plus intenses au niveau mondial ces dernières décennies. Il est ainsi admis que le réchauffement de l'atmosphère terrestre est dû à l'émission par l'activité humaine de gaz (GES) et de particules à effet de serre, en partie masqué par l'effet parasol de quelques autres particules : aucune autre explication crédible n'existe pour coordonner l'ensemble des observations et comprendre les processus en jeu.

Si un consensus général est ainsi atteint sur la réalité et les causes du réchauffement climatique - au point qu'on ait pu proposer une nouvelle époque géologique, l'« Anthropocène »<sup>1</sup> - pour marquer l'importance du phénomène, on ne peut pas dire qu'il en soit de même pour ses effets prévisibles, qui ne sont pas encore tous identifiés, répertoriés et évalués. Ainsi, ses *impacts sur le patrimoine culturel* et les mesures d'adaptation de celui-ci n'avaient pas été pris en compte en tant que tels dans les quatre premiers rapports du Groupe de Travail II « Impacts, Adaptation, Vulnérabilité » du Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC-IPCC). Il n'en est pas de même dans le 5<sup>ème</sup> de ces rapports, qui a été publié plus récemment (2013-2014)<sup>2</sup>.

Le rôle du patrimoine monumental dans le climat local n'est pas négligeable : par exemple, les surfaces nettoyées et claires des monuments réfléchissent le rayonnement solaire, se réchauffent moins et contribuent ainsi à la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain, alors que les mêmes surfaces noircies par la pollution atmosphérique avaient une action inverse importante jusque récemment. Son rôle dans le climat global n'est pas moins négligeable car le patrimoine culturel bâti est considérable : son chauffage en hiver et sa climatisation en été entraînent des émissions de gaz à effet de serre importantes. Le tourisme de masse qu'il génère a aussi une influence notable sur l'équilibre énergétique de la planète.

La France est riche d'un important patrimoine culturel matériel, meuble et immeuble, comme en attestent ses 44 000 monuments historiques et sites archéologiques classés, ainsi que ses nombreux et riches musées et collections. De plus, 42 monuments et sites français sont inscrits sur la liste du Patrimoine de l'Humanité dressée par l'UNESCO,

Le patrimoine culturel bâti comprend les monuments et les cœurs des villes historiques, les musées, les bibliothèques, les collections, les réserves, les grottes ornées et les sites archéologiques... et ce qu'ils abritent : peintures murales ou de chevalet, fresques, vitraux, mosaïques, objets d'art en bois, métal, verre, céramique, papier, polymères, films... Il faut ajouter le patrimoine non bâti comme les paysages culturels, les jardins et le patrimoine agricole remarquables, fruits de siècles de pratiques humaines et particulièrement sensibles aux effets du changement climatique. Sont ainsi concernés le patrimoine ancien, moderne ou encore contemporain.

Tout ce patrimoine est exposé aux effets directs du climat (température, pluie, vent...) et à ses effets indirects (développement de parasites : insectes nuisibles, champignons, plantes supérieures... ou invasion d'espèces étrangères).

Les biens culturels étant souvent uniques, précieux et irremplaçables, il convient d'apprécier les impacts du changement climatique sur leurs matériaux, leur stabilité et leur mode de conservation pour leur transmission aux générations futures.

En France, le devenir du patrimoine culturel dans la nouvelle situation créée par le changement climatique est peu ou pas abordé. En 2011, le Département des études, de la prospective et des statistiques du ministère de la Culture et de la Communication, a mené un exercice de prospective culturelle appelé *Culture & Médias 2030* contenant une fiche thématique n°1 intitulée « *Changement climatique* »<sup>3</sup>. Seuls certains des effets du changement climatique y sont abordés et seulement à l'échelle mondiale. Le seul monuments français cité est la Tour Eiffel « exposée à une corrosion accélérée des métaux qui la composent » sans autre précision. Ce document est important par sa prise de conscience des phénomènes, mais il est malheureusement resté au niveau descriptif, subjectif et qualitatif (sauf pour les données numériques concernant le changement climatique lui-même, aux échelles mondiale et française).

Le 2<sup>ème</sup> Plan National Français d'Adaptation au Changement Climatique (2018-2022)<sup>4</sup> se contente de préconisations vagues dans le domaine du patrimoine, sans qu'aucun plan spécifique d'action climatique d'ensemble n'existe encore en 2021: « *Le ministère de la Culture, les conservateurs de musées et les établissements publics de coopération culturelle œuvreront à l'intégration des impacts du changement climatique dans les plans de gestion des biens patrimoniaux culturels et dans les actions de préservation du patrimoine culturel, et feront en sorte que les plans de sauvegarde des biens culturels soient adaptés aux aléas climatiques prévisibles à moyen et long termes* ». Ainsi, le ministère de la Culture a-t-il affiché dans sa Stratégie de Recherche pour 2017-2020<sup>5</sup> « *L'étude de l'impact de l'environnement (risques naturels, pollution et changement climatique) sur les biens culturels...de même que les recherches visant à renforcer la performance énergétique du bâti ancien et à développer des modes de réhabilitation respectueux de leur valeur patrimoniale* ».

De même, n'est pas ou peu abordée en France, dans le secteur du patrimoine culturel, la manière d'abaisser rapidement les émissions de CO<sub>2</sub> et d'aller vers la « neutralité carbone », en réfléchissant par exemple à la manière de chauffer et d'isoler les édifices culturels anciens en tirant profit par exemple des pratiques passées frugales. Une étude récente<sup>6</sup> a analysé les objectifs théoriques et les mesures pratiques susceptibles de *réduire l'empreinte carbone des édifices du patrimoine culturel*, sachant que ceux-ci représentent un large pourcentage des bâtiments européens et que, parmi eux, 35% ont plus de 50 ans et que 75% ont une utilisation inefficace de l'énergie. La contribution potentielle du secteur culturel à la réduction des émissions de gaz à effet de serre est donc significative et requiert des actions. Par exemple, la réduction des voyages en avion pour se rendre aux congrès internationaux ou pour effectuer des missions sur les monuments, ou encore la réduction des calculs informatiques, comme le recommande l'association Labos1.5.

Le patrimoine culturel peut apporter une contribution à *l'histoire passée et récente du climat* en lien avec celle de son environnement (par exemple, par la dendroclimatologie issue des bois de construction du patrimoine bâti) ou encore apporter une contribution à *l'évolution future* du climat par les mesures d'atténuation et d'adaptation le concernant (par exemple, en réduisant son empreinte carbone).

On peut estimer que *136 biens du Patrimoine mondial* sur les 1121 recensés en 2019 par l'UNESCO seraient concernés par des crues conséquentes : pas seulement Venise, Londres, Pise, Pompéi... mais aussi Arles, le Mont Saint Michel, Le Havre et le Port de la Lune à Bordeaux<sup>7</sup>. De même, sur les *49 sites côtiers méditerranéens* inscrits sur la Liste de l'UNESCO, 47 (dont Arles) seraient affectés par la submersion (37 sites) et/ou l'érosion côtière (42 sites) d'ici 2100<sup>8</sup>. C'est dire que le patrimoine français est effectivement menacé par la montée du niveau des océans qui touchera tout le littoral atlantique et méditerranéen.

Il est par ailleurs dommage que, dans son livre-manifeste « *Sauvons notre patrimoine* »<sup>9</sup>, le

talentueux et très actif Stéphane Bern n'évoque pas ce que deviendra, dans les prochaines décennies, le patrimoine qu'il aura contribué à sauver quand le climat, qui aura changé, ne sera plus celui qui existait lorsque les monuments avaient été édifiés ou restaurés. De même, n'évoquer que « *des ans l'irréparable outrage qui menace nos monuments* » (p. 11) pour expliquer l'état dans lequel beaucoup se trouvent est plutôt réducteur quand on sait que le temps qui passe est la seule variable sur laquelle l'homme n'a pas d'emprise, alors qu'il en a une sur la pollution et le climat. De même écrire : « *Nous ne pouvons pas traiter le temps qui passe avec indifférence, car lui n'est pas indifférent à nos édifices. Ses effets sont réels, parfois irréversibles, mais la bonne nouvelle est que nous pouvons y faire quelque chose : en veillant sur notre patrimoine, en décidant de travaux d'entretien suffisamment tôt, nous pouvons ralentir, voire annuler les processus de dégradation* » (p. 95), c'est s'attaquer aux effets plutôt qu'aux causes réelles des dégradations que sont la pollution et le climat sur lesquels il faut d'urgence veiller et agir car les travaux d'entretien et de restauration ne suppriment pas les causes des dégradations. Restaurer Notre-Dame de Paris après l'incendie du 15 avril 2019 sans se préoccuper de son devenir dans le futur climat parisien serait faire une impasse lors de la conception de son nouveau toit et de son isolation, du nouveau mode de chauffage en hiver et de climatisation en été, alors que l'on prévoit que la température moyenne à Paris aura augmenté en 2070 de 3°C en hiver et de 4°C en été<sup>10</sup>, augmentation exacerbée par l'effet d'îlot de chaleur urbain, tout particulièrement en cas de canicule ; sans compter que la Seine coule aux pieds de la cathédrale, ajoutant un risque climatique. Cette préoccupation répond à la recommandation formulée le 23 mai 2019 devant l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques par le Président d'ICOMOS-France, Jean-François Lagneau : « *Restaurer Notre-Dame... sans oublier les notions de développement durable et de dérèglement climatique* ». C'est cette même préoccupation qui a amené l'ICOMOS-France à créer en son sein un Groupe de Travail « Patrimoine et Climat ». De même, le Haut Conseil Français pour le Climat recommande dans son Rapport « *Rénover mieux : leçons d'Europe* » (2020) ([@hc\\_climat](http://www.hautconseilclimat.fr)) de : « *Prendre en compte le confort de toute saison et la ventilation lors de la rénovation globale des bâtiments : identifier les besoins d'adaptation des bâtiments français selon les régions et zones climatiques* ».

Les climatologues français ne sont pas insensibles aux problèmes posés par le patrimoine. En témoignait en 2015, dans la revue « *La Météorologie* », un article<sup>11</sup> dans lequel on peut lire : « *L'impact du changement climatique et de la pollution atmosphérique sur les bâtiments de grande valeur tels que les monuments historiques est également un sujet de préoccupation. Les fortes chaleurs, le gel, la pluie, la cristallisation du sel présent... sur les matériaux poreux tels que la pierre, ou encore l'acidité de certaines particules liées à la pollution atmosphérique affectent la plupart des bâtiments. Ces facteurs seront amenés à évoluer en lien avec les changements attendus du climat et de la qualité de l'air, et la préservation du patrimoine bâti devra se traduire par des mesures d'adaptation ciblées en fonction des régions et des matériaux...* ». On ne peut mieux résumer la situation.

La présente brochure se fixe pour objectifs de présenter, sous une forme accessible à un large public, les modèles et scénarios climatiques projetés pour la France, puis les différents impacts prévisibles du futur climat sur le patrimoine culturel matériel français, ainsi que des suggestions d'adaptation de ce dernier. Les résultats des recherches menées en France dans ce contexte seront spécialement développés bien qu'elles soient assez peu nombreuses : *l'érosion et le noircissement des façades en calcaire, l'altération des vitraux médiévaux et des métaux, les remontées capillaires d'eau dans les murs poreux et la cristallisation des sels, les crues et les étiages des fleuves, l'érosion/submersion des sites archéologiques côtiers...* On ne s'étonnera pas de la place importante occupée par Paris dans les exemples développés, non que le climat et le patrimoine soient une exclusivité parisienne, mais il se trouve que beaucoup des études françaises sur ce sujet ont concerné la capitale, son climat et son patrimoine.

D'autres impacts potentiels du changement climatique seront décrits. Ce sont soit des extrapolations pour la France de résultats d'études concernant le patrimoine culturel à l'échelle européenne (*les effets du gel-dégel, les environnements intérieurs*), soit des études ne concernant pas spécifiquement le patrimoine culturel mais dont les résultats peuvent être raisonnablement transposés à celui-ci (*la stabilité des édifices sur sols argileux*).

On ne traitera pas ici de certains domaines du patrimoine culturel pourtant très importants : le patrimoine immatériel, les paysages culturels et l'archéologie (sauf les sites côtiers menacés par l'érosion et la submersion marines), réservant ces thématiques à des spécialistes avertis de ces problématiques. De même, on se cantonnera au patrimoine de la métropole, le patrimoine ultra-marin, situé dans les océans atlantique, indien et pacifique en climat tropical (sauf Saint Pierre et Miquelon), subit des influences marines majoritaires qui l'éloignent beaucoup du climat de la France métropolitaine ; les impacts du changement climatique y sont de ce fait différents et méritent donc des études spéciales.

## Références

- <sup>1</sup> Crutzen, P.J., Stoermer, E.F., 2000: The "Anthropocene", *Global Change NewsLetter*, 41, 17-18.
- <sup>2</sup> GIEC, 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, Genève, 161 p.
- <sup>3</sup> Département des études, de la prospective et des statistiques du ministère de la Culture et de la Communication, 2011 : *Culture & Médias 2030, Fiche thématique n°1 « Changement climatique »*, La Documentation française, 207 p.
- <sup>4</sup> Plan National français d'Adaptation au Changement Climatique 2, 2018-2022 : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>
- <sup>5</sup> Stratégie de Recherche du ministère de la Culture, 2017-2020, Département de la Recherche, de l'Enseignement Supérieur et de la Technologie, 32 p. [www.culturecommunication.gouv.fr/Thematiques/Enseignement-superieur-et-Recherche](http://www.culturecommunication.gouv.fr/Thematiques/Enseignement-superieur-et-Recherche)
- <sup>6</sup> Sesana, E., Bertolin, C., Gagnon, A.S., Hughe, J.J., 2019: Mitigating Climate Change in the Cultural Built Heritage Sector, *Climate*, 7, 90; [www.mdpi.com/journal/climate](http://www.mdpi.com/journal/climate), doi:10.3390/cli7070090
- <sup>7</sup> Marzeion, B., Leversmann, A., 2014: Loss of cultural world heritage and currently inhabited places to sea-level rise, *Env. Res. Letters*, 9, 3, 7 pp.
- <sup>8</sup> Reimann, L., Vafeidis, A. T., S., Hinkel, J., Tol. R.S., 2018: Mediterranean UNESCO World Heritage at risk from coastal flooding and erosion due to sea-level rise. *Nature Communications* 9(1): 4161
- <sup>9</sup> Bern, S., 2019 : « Sauvons notre patrimoine », Plon éd., 226 p.
- <sup>10</sup> Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014 : Le climat de la France au XXIe siècle, Vol. 4, Scénarios régionalisés pour la métropole et les régions d'outre-mer, *Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie*, 61 p.
- <sup>11</sup> Martin, E., Salas y Mélia, D., Badeau, V., Delire, C., Gattuso, J.-P., Lemonsu, A., Masson, V., Pigeon, G., Regimbeau, M., Viguié, V., 2015 : Impacts, adaptation et vulnérabilité des systèmes naturels et humains en Europe, *La Météorologie*, 88, n° spécial « Climat », 83-95.

## *1<sup>ère</sup> Partie :*

### *Généralités sur le changement climatique*

#### *dans ses rapports*

#### *avec le patrimoine culturel*

Cette 1<sup>ère</sup> Partie expose des *généralités* concernant les rapports existant entre le changement climatique et le patrimoine culturel mondial, européen et français.

Il s'agit d'abord de faire le bilan global des *textes internationaux, des projets et résultats scientifiques*, qui sont très récents et encore largement à accomplir, surtout en France.

Les *modèles et scénarios du changement climatique* aux échelles globale, européenne puis française, sont ensuite exposés de façon suffisamment simple pour être accessibles à une large audience.

Enfin, trois notions utiles sont développées : la *vitesse de survenue des évènements* impliquant le patrimoine, lente ou extrême ; la contribution possible du patrimoine culturel à la *résilience des villes* ; les *Fonctions Dose-Réponse*, qui sont la clé d'une approche quantitative des dommages aux matériaux. Pour terminer, un résumé très restreint du *vocabulaire* utilisé dans ce domaine est fourni.



## **Le patrimoine culturel français face au changement climatique mondial : une histoire récente encore largement à écrire ...**

### **Les textes et travaux scientifiques fondateurs**

Les problèmes posés au patrimoine culturel par le changement climatique ont toujours été et demeurent une des préoccupations importantes de l'UNESCO, surtout vis à vis des 1121 biens culturels, naturels et mixtes (dont 45 en France) qu'elle a inscrits sur sa liste depuis 1972<sup>1,2</sup>. Ainsi, le Centre du Patrimoine Mondial de l'UNESCO a publié en 2007 un premier rapport important sur le changement climatique et le patrimoine mondial<sup>3</sup> selon une approche par *facteurs climatiques* interagissant possiblement avec le patrimoine culturel dans l'avenir et en adoptant une *vision uniquement qualitative* mais très imaginative.

Bien que non focalisées sur la France mais l'englobant, la plupart des recherches scientifiques sur le patrimoine culturel dans ses relations avec le changement climatique ont été menées essentiellement dans trois projets financés par la Commission européenne : « Noah's Ark »<sup>4,5</sup>, « Climate for Culture »<sup>6,7</sup> et « 3encult »<sup>8</sup>. A la différence du rapport de 2007 de l'UNESCO, ces projets ont une approche mixte, par *facteurs climatiques* et par *matériaux*, avançant de plus des *recommandations* aux différents acteurs en charge du patrimoine culturel pour sa protection face au changement climatique actuel et annoncé. Ce sont des essais d'*évaluation quantitative* des projections dans l'avenir en faisant appel à des modèles climatiques prédictifs selon plusieurs scénarios, à des fonctions de dommage et à la représentation de la distribution géographique à l'échelle européenne des impacts sur le patrimoine culturel meuble et immeuble, intérieur et extérieur.

Le 5<sup>ème</sup> Rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC-IPCC)<sup>9</sup> paru en 2013-2014, cite pour la première fois le *patrimoine bâti, culturel ou non* ; c'est là un signe important pour la communauté scientifique impliquée dans cette problématique : « *La variabilité accrue du climat, des températures plus chaudes, des changements dans les précipitations et une humidité plus grande accéléreront la détérioration et la dégradation météorologique des structures en pierre et en métal de beaucoup de villes... Les risques accrus que le changement climatique apporte à l'environnement bâti... sont aussi valables pour le patrimoine bâti...* ».

Le GIEC s'est penché sur la problématique des villes face au changement climatique lors d'une conférence internationale (« Cities IPCC »)<sup>10</sup> tenue à Edmonton en mars 2018 et il en fera le thème de son prochain 7<sup>ème</sup> cycle d'évaluation après 2023, car il considère que « *le rôle des villes en matière de lutte contre le changement climatique est particulièrement important étant donné l'accroissement des populations urbaines, en raison duquel 68% de la population mondiale devrait vivre dans les villes d'ici 2050* ».

Les cadres d'action de Hyogo (2005-2015)<sup>11</sup> et de Sendai (2015-2030)<sup>12</sup> pour la réduction des risques de catastrophes, qui ont été adoptés lors de conférences mondiales des Nations-Unies, invitent les États membres à « *assurer ou à promouvoir la protection des institutions culturelles, des collections et des sites d'intérêt historique, culturel ou religieux* ». Les catastrophes consécutives au changement climatique entrent dans ces cadres.

Dans son livre « *Microclimate for Cultural Heritage* »<sup>13</sup>. Dario Camuffo, du Conseil National Italien de la Recherche de Padoue (Italie), fait un exposé très documenté des relations patrimoine culturel-changement climatique ; c'est une vision synthétique qui fait actuellement référence. Par ailleurs, trois livres reprennent le contenu d'une série de cours doctoraux donnés de 2007 à 2017 au Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels de Ravello (Italie) sur le même sujet<sup>14,15,16</sup>. Un autre ouvrage, intitulé « *Preservation of Cultural Heritage and Resources Threatened by Climate*

*Change* », rassemble 10 contributions parues dans la revue *Geosciences* en 2018, dont une française sur les dégradations dues aux sels <sup>17</sup>. Un Rapport au Conseil de l'Europe <sup>18</sup> et trois articles dans des revues françaises <sup>19,20,21</sup> illustrent de plus la contribution française à la problématique et sa modestie.

Un *Index de Vulnérabilité au Changement Climatique* (Climate Vulnerability Index, CVI) <sup>22</sup> a été créé et appliqué à quelques sites du Patrimoine mondial, mais à aucun en France.

Une brochure a été éditée par l'US National Park Service en 2016 <sup>23</sup>, suivie de deux autres, éditées en 2019 l'une par ICOMOS-International <sup>24</sup> et l'autre par Historic Environment Scotland <sup>25</sup> : elles sont destinées au public intéressé par la protection du patrimoine culturel dans le contexte du dérèglement climatique. En 2020, l'Assemblée générale de l'ICOMOS <sup>26</sup> a adopté une résolution sur le *Patrimoine culturel et l'urgence climatique* qui « Appelle toute la communauté de l'ICOMOS à mettre en œuvre des réponses patrimoniales aux changements climatiques qui s'efforcent de protéger tous les types de patrimoine des impacts du changement climatique, actuels et prévisibles, survenant soudainement ou lentement, en mettant en place des évaluations de la vulnérabilité et des risques, un suivi et en mettant en œuvre des stratégies appropriées d'adaptation au changement climatique et des stratégies d'atténuation des catastrophes, de préparation, d'intervention et de rétablissement tenant compte des risques ».

Une revue détaillée et exhaustive de la *littérature* existant sur le sujet à l'échelle globale a été publiée récemment en ligne <sup>27</sup>.

Toutes ces approches sont très générales, sans focalisation géographique (sauf une sur l'Ecosse). La France n'est donc pas directement citée bien que les sujets traités la concernent implicitement. La présente brochure a été conçue dans le même esprit afin de pallier ce manque.

## Références

- <sup>1</sup> UNESCO, 1972 : Convention concernant la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel, <http://whc.unesco.org/fr/convention>
- <sup>2</sup> UNESCO, 2019 : Liste du patrimoine mondial, <https://whc.unesco.org/fr/list>
- <sup>3</sup> UNESCO, 2007 : Changement climatique et patrimoine mondial. Rapport sur la prévision et la gestion des effets du changement climatique sur le patrimoine mondial et stratégies pour aider les Etats parties à mettre en œuvre des réactions de gestion adaptées", Rapport n°22, <http://whc.unesco.org/fr/series>
- <sup>4</sup> Projet européen « Noah's Ark » 2003-2007: Global Climate Change Impact on Built Heritage and Cultural Landscapes, <http://noahsark.isac.cnr.it/deliverables.php>
- <sup>5</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.
- <sup>6</sup> Projet européen « Climate for Culture », 2009-2014 : Damage risk assessment, economic impact and mitigation strategies for sustainable preservation of cultural heritage in times of climate change, <https://www.climateforculture.eu>
- <sup>7</sup> Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L., Jacob, D., Mikolajewicz, U., Broström, T., Ashley-Smith, J., Schellen, H.L., Martens, M., van Schijndel, J., Antretter, F., Winkler, M., Bertolin, C., Camuffo, D., Simeunovic, G., Vyhliđal, T., 2015 : Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Herit. Sci.*, **3**, 38, doi:10.1186/s40494-015-0067-9
- <sup>8</sup> Projet européen « 3encult », 2010-2014 : Efficient Energy for EU Cultural Heritage, [www.3encult.eu/en/project/welcome/default.html](http://www.3encult.eu/en/project/welcome/default.html)
- <sup>9</sup> GIEC, 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, Genève, 161 p.
- <sup>10</sup> CitiesIPCC, 2018 : Programme mondial de recherche et d'action relatif aux villes et à la science des changements climatiques, *Cities and Climate Change Science Conference*, Edmonton, Alberta, Canada, <https://www.ipcc.ch/event/cities-and-climate-change-science-conference/>
- <sup>11</sup> Hyogo, 2005-2015 : Cadre d'action pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes, UNISDR, Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophes.
- <sup>12</sup> Sendai, 2015-2030 : Cadre d'action pour la réduction des risques de catastrophes, UNISDR, Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophes.

- <sup>13</sup> Camuffo, D., 2019: Microclimate for Cultural Heritage, 3<sup>rd</sup> Edition, Elsevier, 584 p.
- <sup>14</sup> Lefèvre, R.-A., Sabbioni, C., Eds., 2010: Climate Change and Cultural Heritage, Edipuglia, Bari, Publ., 201 p.
- <sup>15</sup> Lefèvre, R.-A., Sabbioni, C., Eds., 2016: Cultural Heritage from Pollution to Climate Change, Edipuglia, Bari, Publ., 136 p.
- <sup>16</sup> Lefèvre, R.-A., Sabbioni, C., Eds., 2018: Cultural Heritage facing Climate Change: Experiences and Ideas for Resilience and Adaptation, Edipuglia, Bari, Publ., 134 p. <https://www.coe.int/fr/web/europarisks/publication-cultural-heritage-and-climate-change>
- <sup>17</sup> Benéndez, B., 2019: Estimators of the Impact of Climate Change in Salt Weathering of Cultural Heritage, in *Preservation of Cultural Heritage and Resources Threatened by Climate Change*, Bertolin, C., edit., *Geosciences*, Special Issue, 118-131; [https://www.mdpi.com/journal/geosciences/special issues/Preservation Cultural Heritage Climate Change](https://www.mdpi.com/journal/geosciences/special%20issues/Preservation%20Cultural%20Heritage%20Climate%20Change); doi:10.3390/geosciences8110401
- <sup>18</sup> Sabbioni, C., Cassar, M., Brimblecombe, P., Lefèvre, R.A., 2008: Vulnerability of Cultural Heritage to Climate Change, *Report to Council of Europe*, AP/CAT, 44, 25 p., publié dans *Pollution atmosphérique*, 202, 157-169.
- <sup>19</sup> Lefèvre, R.-A., 2008 : Les matériaux du Patrimoine culturel dans un environnement en évolution : un enjeu majeur pour le Programme national de recherche sur le patrimoine culturel, *Actes du Colloque Sciences des Matériaux du Patrimoine Culturel, Techné*, n° hors série, 5-14.
- <sup>20</sup> Lefèvre, R.-A., Martin, D., 2011 : Le patrimoine culturel bâti face aux risques du changement climatique, *La Météorologie*, 74, 15-22
- <sup>21</sup> Lefèvre, R.-A., 2013 : Patrimoine culturel bâti et changement climatique, *Pollution atmosphérique, Climat, Santé, Société*, n° spécial « Adaptation au climat et maîtrise de la qualité de l'air », 176-179.
- <sup>22</sup> Day, J.C., Scott F. Heron, S.F., Markham, A. 2020: Assessing the climate vulnerability of the world's natural and cultural heritage. *Parks Stewardship Forum* 36(1): 144–153, <https://escholarship.org/uc/psf>
- <sup>23</sup> Rockman, M., Morgan, M., Ziaja, S., Hambrecht, G., Meadow, A., 2016: Cultural Resources Climate Change Strategy, *US National Park Service*, Washington DC, 60 p.
- <sup>24</sup> Climate Change and Cultural Heritage Working Group, 2019: The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action, ICOMOS, Paris, 62 p. (version française en cours d'élaboration) <https://www.icomos.org/fr/themes-dactualite/changementclimatique/59544-icomos-releases-future-of-our-pasts-report-toincrease-engagement-of-cultural-heritage-in-climate-action-2>
- <sup>25</sup> Harkin, D., Hyslop, E., Johnson, H., Tracey, E., 2019: A Guide to Climate Change Impact on Scotland's Historic Environment, Historic Environment Scotland, 54 p. [www.historicenvironment.scot/impacts](http://www.historicenvironment.scot/impacts)
- <sup>26</sup> ICOMOS, 2020: Patrimoine culturel et urgence climatique, *Assemblée générale de l'ICOMOS*, Résolution 20GA/15 , <https://www.icomos.org/en/focus/climate-change/85740-icomos-declares-a-climate-emergency>
- <sup>27</sup> Sesana, E., Gagnon, A.-S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J.-J., 2021 : Climate change impacts on cultural heritage: A literature review, *Wires Climate change*, 29 p., Wiley online library, <https://doi.org/10.1002/wcc.710>
-

## Les modèles et scénarios du changement climatique global

La *cause principale* du réchauffement climatique global de la Terre est l'accumulation dans son atmosphère de *gaz et de particules à effet de serre* produits, entre autres mais surtout, par l'activité humaine : O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC...suies carbonées inorganiques... qui empêchent l'énergie radiative émise par la Terre de s'évacuer vers l'espace. La vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) a un effet de serre très important ; mais une vapeur n'est pas un gaz, par conséquent sa concentration dans l'atmosphère est réglée par le climat, indépendamment de l'activité humaine (sauf l'effet de l'homme sur le climat). Inversement, les sulfates, les nitrates et les particules carbonées organiques, principalement issus des activités humaine et/ou volcanique, *diminuent la température* de l'atmosphère terrestre en faisant écran à la pénétration du rayonnement solaire.

Pour projeter les évolutions possibles du climat et de ses impacts, les chercheurs utilisent à la fois des modèles du système climatique et des études économiques et démographiques. Les simulations climatiques sont réalisées à partir de Modèles de Circulation Générale. Pour simuler au mieux l'évolution du climat, de nombreux « forçages » sont pris en compte, qu'ils soient naturels (éruptions volcaniques, activité solaire, ...) ou anthropiques (émissions de gaz ou aérosols à effet de serre). Si, pour le climat passé récent, l'ensemble des forçages peuvent être déterminés à partir d'observations, pour les simulations du climat futur seuls les forçages anthropiques sont déterminés au travers de scénarios d'émissions <sup>1</sup>.

Le GIEC publie tous les six ans un *Rapport d'évaluation* (Assessment Report : AR). Le prochain (AR6) sera publié en 2021. Trois rapports spéciaux, plus spécifiques, auront été publiés au cours de ce 6<sup>ème</sup> cycle d'évaluation : *Réchauffement climatique à 1,5°C (SR15)* <sup>2</sup>, *Changement climatique et utilisation des sols (SRCCL)* <sup>3</sup> et *Océan et cryosphère dans un climat en évolution (SROCC)* <sup>4</sup>.

Dans les quatre premiers rapports d'évaluation du GIEC, les projections climatiques étaient fondées sur les scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios : A1, A2, B1, B2, A1B...) <sup>5</sup> proposant plusieurs évolutions socio-économiques (population, économie, développement industriel et agricole) ainsi que la chimie atmosphérique et le changement climatique (*Fig. 1*).

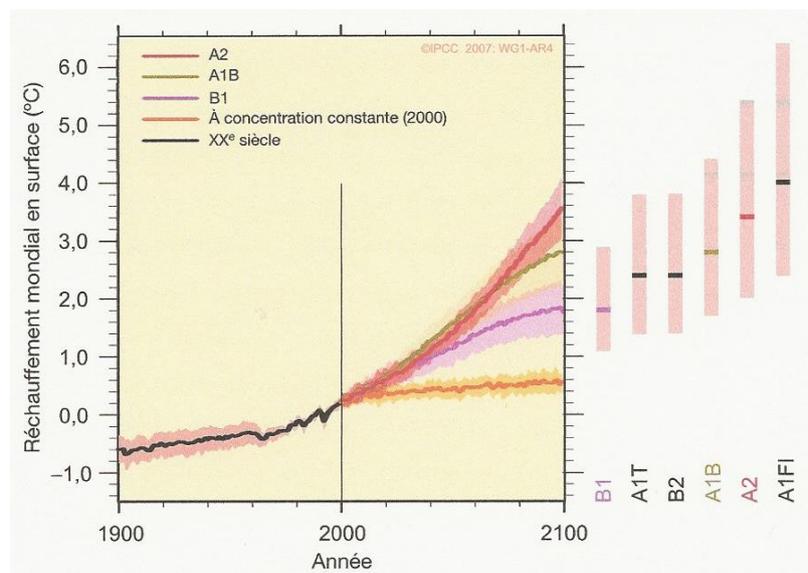


Fig. 1 – Evolution de la température moyenne à la surface du globe entre 2006 et 2100 par rapport à la période 1986-2005 selon les scénarios SRES du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC <sup>5</sup>.

Pour son 5<sup>ème</sup> Rapport d'évaluation <sup>6</sup>, à partir de la littérature scientifique, le GIEC a introduit quatre nouveaux scénarios appelés *profils représentatifs d'évolution de concentration* (RCP : Representative Concentration Pathways) (Fig. 2).

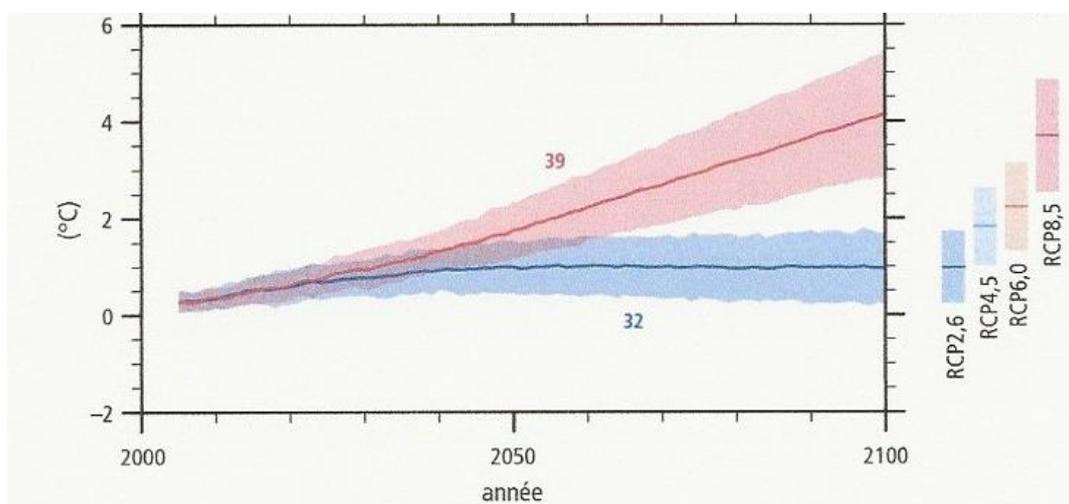


Fig.2 – Evolution de la température moyenne à la surface du globe entre 2006 et 2100 par rapport à la période 1986-2005 selon les scénarios RCP du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC <sup>6</sup>.

Ce 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC réaffirme, à la suite des précédents, que *l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) pourrait entraîner des changements majeurs de la température*, et donc la fonte des glaces et l'élévation du niveau des mers. Quelles que soient les nuances formulées, la conclusion générale est très claire : les activités humaines, notamment l'usage des énergies fossiles, conduisent à une hausse exceptionnelle de la concentration des GES qui transforme le climat à un rythme jamais vu par le passé. Le lien entre activités humaines et accroissement des températures est extrêmement probable (à plus de 95%).

Dans ce 5<sup>ème</sup> Rapport, les quatre scénarios RCP permettent de modéliser le climat futur sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de GES qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100). Chacun donne une variante jugée probable du climat. Les quatre scénarios sont nommés d'après la gamme de *forçage radiatif* d'origine anthropique ainsi obtenue pour l'année 2100 : le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de +2,6 W/m<sup>2</sup>, le scénario RCP4.5 de +4,5 W/m<sup>2</sup>, et de même pour les scénarios RCP6.0 et RCP8.5. Le forçage radiatif est la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par la Terre. S'il est positif, il conduit à une absorption d'énergie par le système climatique et donc à un réchauffement.

En 2021, le GIEC introduira dans son 6<sup>ème</sup> Rapport d'évaluation (AR6) des *profils socio-économiques partagés* (SSP : Shared Socioeconomic Pathways) <sup>7</sup>, ou profils alternatifs plausibles d'évolution économique de la société et des écosystèmes qui, en combinaison avec les RCP, permettent de mener les recherches sur les impacts, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique, en particulier dans les villes.

En signant l'Accord de Paris, lors de la COP21 en 2015, 195 pays se sont engagés à limiter le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C. Le *Rapport spécial SR15 du GIEC*<sup>2</sup> explore les options pour contenir ce réchauffement à un niveau très bas (de type RCP1.9), c'est-à-dire à 1,5°C au-dessus du niveau pré-industriel. Même si cet objectif n'est pas impossible à atteindre, il requiert des mesures fortes et immédiates. Dans cette idée, il faudrait réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à quasiment zéro au cours de la prochaine dizaine d'années (2030).

Alors qu'en 2011, la *concentration moyenne de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>* était de 391 ppm, elle serait, en 2100, de 421 ppm selon le RCP2.6, de 538 ppm selon le RCP4.5, de 670 ppm selon le RCP6.0 et de 936 ppm selon le RCP8.5. Cependant, si l'on prend en compte non pas le seul CO<sub>2</sub>, mais l'ensemble des gaz et particules à effet de serre, on arrive à 475 ppm d'*équivalent CO<sub>2</sub>* pour le RCP2.6, 630 ppm pour le RCP4.5, 800 ppm pour le RCP 6.0 et 1313 ppm pour le RCP8.5. Ces concentrations dépendent directement des émissions.

Les *scénarios d'émission des gaz à effet de serre* sont représentés Fig. 3. Le scénario RCP2.6 implique de fortes réductions d'émissions des GES par la communauté internationale : c'est le plus optimiste. Le RCP8.5 est le plus pessimiste, mais extrême car très utilisateur de combustibles fossiles, mais il reste probable car il correspond à la prolongation des émissions actuelles.

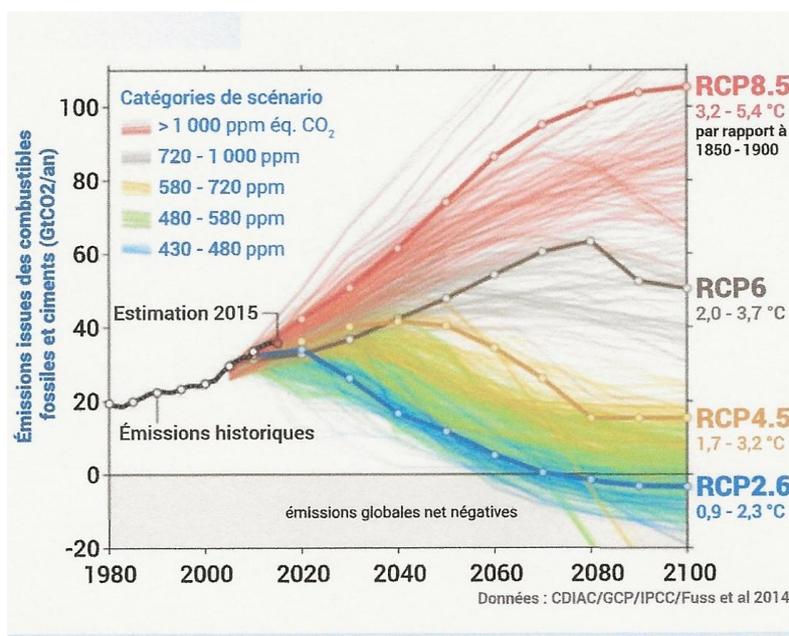


Fig. 3 – Evolution des émissions de gaz à effet de serre (Equivalent CO<sub>2</sub>) de 1980 à 2100, selon les scénarios RCP 2.6, 6 et 8.5 du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>13</sup>

Le 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC prévoit une *hausse des températures de 1,5 à 4,5°C* (Fig. 2) et une *élévation du niveau des mers* entre 29 et 82 centimètres d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2081-2100) due à la fonte des glaces du Groenland et de l'Antarctique, et à la dilatation de la masse des eaux océaniques. Cette estimation a été revue à la hausse en 2019<sup>4</sup> : entre 43 cm selon le RCP2.6 et 84 cm selon le RCP8.5 en 2100. Mais l'occurrence de très hauts niveaux marins augmente fortement avec la montée graduelle du niveau des océans : ainsi, certains records du siècle passé, qui se produisaient une fois par siècle, pourraient se produire chaque année, avec les risques de submersion et d'érosion du littoral qu'ils impliquent.

En moyenne, les *précipitations augmenteront* à l'échelle planétaire d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Les régions humides aujourd'hui deviendront globalement plus humides et les zones sèches deviendront plus sèches. Il est « pratiquement certain » que l'on verra une tendance à l'augmentation de l'intensité des événements pluvieux. Selon le *Rapport spécial SR15 du GIEC* <sup>2</sup>, les risques dus aux sécheresses et au déficit de précipitations, particulièrement dans le pourtour méditerranéen, seront plus grands pour une augmentation globale de température de 2°C que pour 1,5°C. Ceci n'est pas sans conséquences sur la stabilité des édifices, en particulier culturels, construits sur des sols contenant des minéraux argileux gonflant par l'humidité puis se rétractant par la sécheresse.

La *qualité de l'air* (pollution par l'ozone et les PM2,5 -Particulate Matter  $\leq 2,5 \mu\text{m}$  dans les basses couches atmosphériques) est essentiellement déterminée par les émissions plutôt que par le changement climatique physique, sauf le lessivage de l'atmosphère par la pluie, surtout si elle devient plus fréquente.

Une évaluation des effets des changements du climat et des émissions de polluants sur la *qualité de l'air en Europe* dans les années 2030 et 2050, par comparaison avec le climat et les émissions du passé récent, a été faite en appliquant les sorties du modèle Arpège-Climat de Météo France dans le scénario RCP8,5 <sup>8</sup>. Les polluants en question intéressent le patrimoine culturel : O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM2,5, PM10, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>. Cette évaluation montre qu'une augmentation de l'ozone en surface dans l'Europe du Nord-Ouest et une décroissance au Sud sont prévisibles. Les aérosols sulfatés devraient augmenter en 2030 dans la partie nord de l'Europe, mais décroître dans la partie continentale en été. En hiver, on observera une décroissance sur tout le domaine en 2030 et plus encore en 2050.

Les *modèles climatiques* utilisés par les chercheurs français intéressés aux impacts sur le patrimoine culturel sont : Arpège-Climat et Aladin-Climat de Météo France et Hadley du Met-Office britannique. Les projections concernant la *pollution atmosphérique* se basent sur le modèle européen d'émissions GAINS <sup>9</sup>. Les deux projets européens, Noah's Ark <sup>10</sup> et Climate for Culture <sup>11</sup>, dont la cartographie a englobé la France, ont utilisé respectivement les modèles Hadley du Met Office et REMO <sup>12</sup> du Max Plank Institut de Hambourg.

Enfin, signalons l'existence en France des très pratiques portails DRIAS <sup>13</sup> et ClimatHD de Météo France <sup>14</sup>, qui mettent à la disposition du grand public des projections climatiques régionalisées sous différentes formes, que ce soient des données corrigées, des indices ou encore des représentations cartographiques.

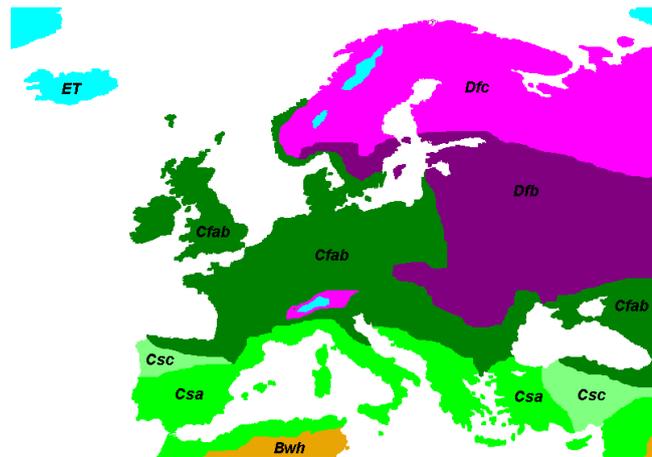
## Références

- <sup>1</sup> Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014 : Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle, Vol. 4, Scénarios régionalisés pour la métropole et les régions d'outre-mer, *Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie*, 61 p.
- <sup>2</sup> IPCC, 2018: Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.). In press.
- <sup>3</sup> IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., P. Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J. (eds.), In press.

- <sup>4</sup> IPCC, 2019: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N., (eds.). In press.
  - <sup>5</sup> GIEC, 2007 : 4<sup>ème</sup> Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, 103 pages.
  - <sup>6</sup> GIEC, 2014 : 5<sup>ème</sup> Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, Genève, 161 p.
  - <sup>7</sup> O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur R., van Vuuren, D.P., 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways, *Climatic Change*, 122:387–400, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0905-2>
  - <sup>8</sup> Lacressonnière, G., Peuch, V.-H., Vautard, R., Arteta, J., Déqué, M., Joly, M., Josse, B., Marécal, V., Saint-Martin D., 2014 : European air quality in the 2030s and 2050s: Impacts of global and regional emission trends and of climate change, *Atm. Env.*, 92, 348-358.
  - <sup>9</sup> GAINS: The Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies, <http://gains.iiasa.ac.at>
  - <sup>10</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.
  - <sup>11</sup> Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L. *et al.* Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Herit Sci* **3**, 38 (2015) doi:10.1186/s40494-015-0067-9
  - <sup>12</sup> Jacob D, Elizalde A, Haensler A, Hagemann S, Kumar P, Podzun R, Rechid D, Remedio AR, Saeed F, Sieck K, Teichmann C, Wilhelm C., 2012: Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions., *Atmosphere*, 3:181–99.
  - <sup>13</sup> DRIAS, 2020: Les nouvelles projections climatiques de référence pour la métropole. Les futurs du climat : Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements, Ministère de la Transition Ecologique et du Développement Durable, (<http://www.drias-climat.fr/>).
  - <sup>14</sup> ClimatHD, Application interactive de Météo France, Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France, <http://www.meteofrance.fr/actualites/29365237-climathd-l-application-interactive-de-meteo-france>
-

## Quel futur climat pour le patrimoine en Europe ?

P. Brimblecombe, de l'Université d'East Anglia à Norwich (Royaume-Uni), a introduit la notion de « *Climatologie du Patrimoine* » (« *Heritage Climatology* ») <sup>1</sup> et a proposé une cartographie simple fondée sur celles de Köppen-Geiger modifiées par Kottek-Grieser *et al.* <sup>2</sup>. Plutôt que d'être fondée sur les variables météorologiques comme la température et les précipitations, cette nouvelle approche considère les dommages potentiels aux structures bâties. Sept régions climatiques du patrimoine divisent ainsi l'Europe, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord, depuis une zone très chaude et aride jusqu'à une zone polaire et de montagne (*Fig. 1*) :



*Fig. 1 – Carte de Köppen-Gieger, modifiée par Kottek et al. <sup>2</sup>, et adaptée par P. Brimblecombe <sup>1</sup> au patrimoine culturel.*

- *Bwh* : Climat très chaud et aride. Sol sec avec peu de végétation ; sable soulevé par le vent (tempêtes de poussières et ensablement des constructions) et stress thermique extrême avec thermoclastisme (éclatement des pierres sous l'effet de la température). Les constructions en terre sont fréquentes sous ce climat : les matériaux sont friables et sensibles aux rares mais intenses évènements pluvieux ;
- *Csa* : Climat chaud à étés très chauds. Stress thermique avec thermoclastisme sur les matériaux exposés à une forte insolation. La sécheresse estivale peut réduire l'attaque fongique ;
- *Csb* : Climat chaud très humide avec des étés chauds et secs. Des conditions plus sèches et de plus petites variations d'humidité mènent à moins de dommages par les sels et à un dommage potentiel par le gel. Stress thermique potentiel pour les matériaux exposés à une forte insolation ;
- *Cfab* : Climat chaud très humide avec des étés chauds à très chauds. Remontées capillaires d'eau et variations d'humidité causant des dommages par les cristallisations salines. Evènements de gel avec potentiels dommages. Les conditions chaudes et humides amènent une potentielle attaque fongique ;
- *Dfb* : Climat très humide et neigeux avec des étés chauds. De plus faibles variations d'humidité provoquent moins de dommage par les sels, mais des dommages potentiels par le gel.
- *Dfc* : Climat très humide et neigeux avec des étés frais. De plus faibles variations d'humidité provoquent moins de dommage par les sels, mais les conditions froides amènent à un haut potentiel de dommages par le gel en automne et au printemps.
- *ET* : Climat polaire et de montagne. Les conditions sont si froides que le sol reste gelé en surface (permafrost ou pergélisol). Son réchauffement et son dégel peuvent entraîner des instabilités (déchaussement et chute des roches, glissements de terrains, perturbation des sites archéologiques...).

Le patrimoine français est donc *actuellement* concerné par les climats de type *Csa* dans sa région méditerranéenne et *Cfab* dans le reste du territoire, sauf un climat *Dfc* restreint à une petite partie des Alpes. Cette répartition est assez conforme à celle de la « *Climatologie des sels* » de B. Menéndez <sup>3</sup> mais en diffère sensiblement dans les régions côtières où le vent transporte et dépose des sels.

P. Brimblecombe conclut sa *Climatologie du Patrimoine* <sup>1</sup> en confirmant qu'il existe des facteurs spéciaux reliant le climat aux dommages sur les matériaux du patrimoine. Mais les paramètres conventionnels de la météorologie ne sont pas toujours les plus adaptés pour estimer les dommages potentiels : les paramètres cumulatifs de Köppen-Geiger sont utiles mais ne prennent pas en compte le vent qui est un important paramètre pour le patrimoine aussi bien par ses actions lentes (transport et orientation des pluies, du sable et des sels...) qu'extrêmes (tempêtes, tornades...), ni la vulnérabilité des zones côtières très exposées à la montée des eaux marines et aux aérosols marins salés. Ils ne prennent pas non plus en compte l'humidité de l'air car elle y est incluse dans les seules précipitations, alors que l'air est généralement humide entre les pluies.

Ainsi, cette approche du climat peut sembler quelque peu obsolète alors que la climatologie moderne a fait ces dernières décennies des progrès considérables particulièrement pour les représentations cartographiques. Il faut se rendre à l'évidence : le croisement de la climatologie avec les sciences du patrimoine est encore au stade embryonnaire.

La *future* évolution cartographique de la climatologie du patrimoine à l'échelle de l'Europe a été dessinée dans les deux projets européens « Noah's Ark » <sup>4</sup> et « Climate for Culture » <sup>5</sup>. Nous reproduisons dans le chapitre consacré aux sels et en comparaison avec celles B. Menéndez pour la France <sup>3</sup>, les cartes à l'échelle de l'Europe concrétisant les changements projetés entre la période actuelle et la fin du 21<sup>ème</sup> siècle pour la cristallisation des sels telles qu'elles ont été produites dans chacun de ces projets. De même, nous avons reproduit dans les chapitres correspondants, les projections cartographiques du projet « Noah's Ark » pour l'érosion des façades et l'impact du gel-dégel, et celles du projet « Climate for Culture » pour le climat intérieur des édifices.

Les matériaux poreux sont particulièrement sensibles aux changements de phase de l'eau qui produisent des tensions lors du gel, à la cristallisation des sels ou à des transitions minéralogiques avec changement de volume (anhydrite-gypse ou thénardite-mirabilite). Les événements extrêmes tels que les tempêtes et les inondations sont aussi une part importante de la climatologie du patrimoine car leurs effets peuvent être dévastateurs.

Il reste à quantifier au moyen de Fonctions Dose-Réponse les dommages dus à l'action exercée par le climat sur les matériaux et à les intégrer dans les modèles et scénarios climatiques.

## Références

- <sup>1</sup> Brimblecombe, P., 2006 : Heritage climatology, Edipuglia, Bari, p. 49-63
- <sup>2</sup> Kottke, M., Grieser, J. Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006: World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-253.
- <sup>3</sup> Benéndez, B., 2018: Estimators of the Impact of Climate Change in Salt Weathering of Cultural Heritage, *Geosciences*, 8, 401; doi:10.3390/geosciences8110401
- <sup>4</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.
- <sup>5</sup> Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L. *et al.*, 2015: Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Herit Sci* 3, 38.

## Quel climat pour le patrimoine culturel français à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle ?

Les projections contenues dans le 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC <sup>1</sup> à l'échelle de la planète ont été heureusement complétées, pour la France, par celles contenues dans le 4<sup>ème</sup> Rapport sur le climat de la France au 21<sup>ème</sup> siècle <sup>2</sup> et dans celui présenté au Sénat en 2019 par R. Dantec et J.-Y. Roux, intitulé : *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : Urgence déclarée* <sup>3</sup>. Elles ont été actualisées en 2020 par *Les nouvelles projections climatiques de référence pour la métropole*, publiées par Météo-France sur le portail DRIAS <sup>4</sup> et que nous rapportons ci-dessous pour les phénomènes qui intéressent directement le patrimoine culturel : *les températures et donc le gel ; les précipitations, les pluies extrêmes et les sécheresses*.

1 - Les *températures moyennes annuelles* en France, selon trois scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC <sup>1</sup> (Fig. 1), vont augmenter de façon semblable jusqu'en 2040. Mais, en fin de siècle, il y aura divergence et l'on attend un réchauffement de l'ordre de +1°C pour RCP 2.6, +2,2°C pour RCP 4.5 et +4,5°C pour RCP 8.5.

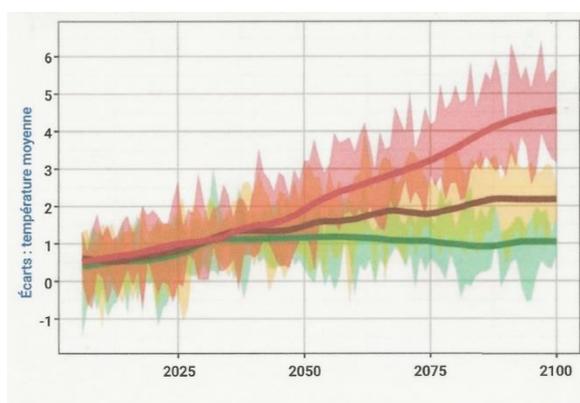


Fig. 1 – Evolution de l'écart de température moyenne annuelle en France au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (par rapport à la référence 1976-2005) pour 3 scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC <sup>1</sup> : RCP 2.6 en vert, RCP 4.5 en orange et RCP 8.5 en rouge <sup>4</sup>.

La carte de répartition géographique des écarts de températures moyennes annuelles à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle selon les 3 scénarios RCP (Fig. 2) montre ainsi un réchauffement général d'intensité croissante du RCP 2.6 au RCP 8.5, avec des distributions identiques selon un gradient croissant nord-ouest/sud-est.

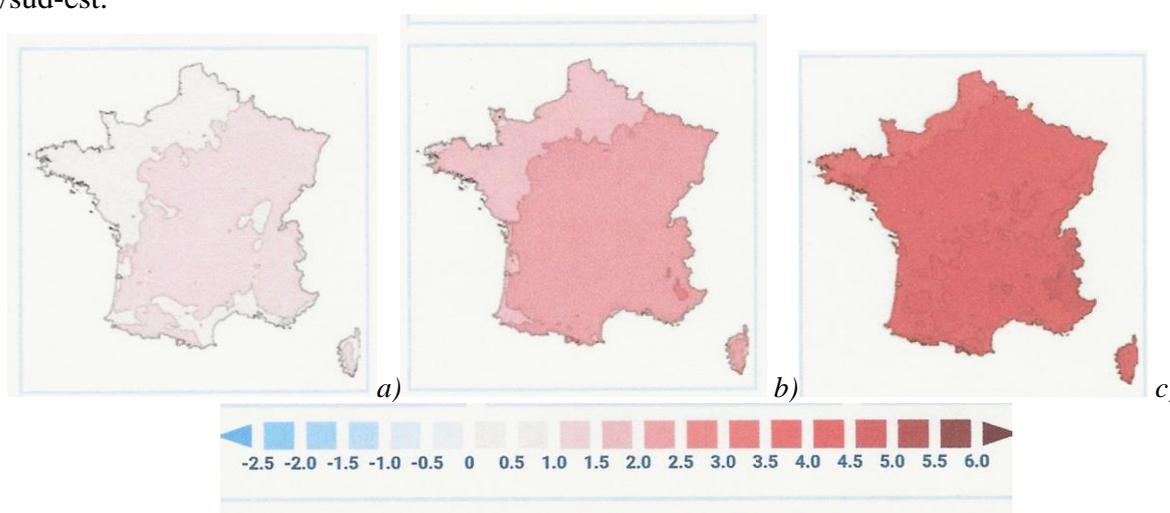


Fig. 2 – Carte des écarts de température moyenne annuelle pour la France à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (par rapport à la référence 1976-2005), selon les scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>1</sup> : RCP 2.6 (a), RCP 4.5 (b) et RCP 8.5 (c)<sup>4</sup>

2 - En fin de siècle, la diminution du nombre de jours de gelées (température minimale inférieure à 0°C) est de 10 à 15 pour RCP 2.6 et de 20 à 35 pour RCP 4.5 et 8.5. La Fig.3 montre la répartition géographique de cette diminution projetée. Les journées de gel pourront devenir rares dans tous les scénarios.

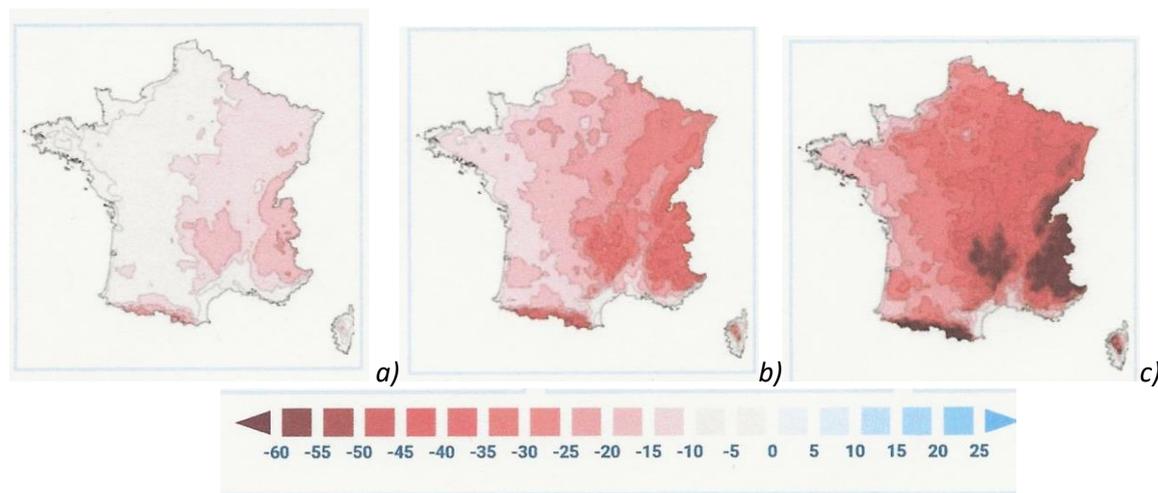


Fig. 3 – Carte des écarts de nombre annuel de jours de gelées à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle en France (par rapport à la référence 1976-2005), selon les scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>1</sup> : RCP 2.6 (a), RCP 4.5 (b) et RCP 8.5 (c)<sup>4</sup>

3 – Le cumul annuel de précipitations pour les trois scénarios RCP au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, est marqué par peu de variation au cours du siècle (Fig. 4).

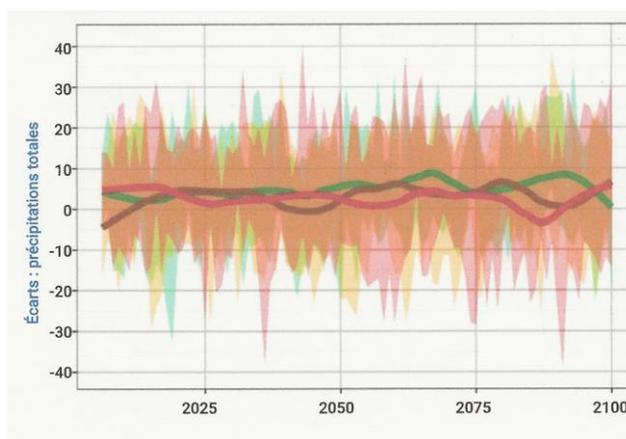


Fig. 4 – Evolution de l'écart relatif du cumul annuel de précipitations au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (par rapport à la référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP 2.6 en vert, RCP 4.5 en orange et RCP 8.5 en rouge<sup>4</sup>.

La carte de répartition géographique des écarts de cumul annuel des précipitations à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Fig. 5), selon les trois scénarios, met en évidence des évolutions faibles mais avec des caractéristiques régionales différentes d'un scénario à l'autre : hausse faible et relativement uniforme

en RCP 2.6, légèrement plus marquée sur le Sud-Est ; hausse faible en RCP 4.5, à l'exception des Pyrénées, et hausse plus marquée à l'Est du pays ; signal nord-sud plus contrasté avec le RCP 8.5 avec une baisse dans la moitié sud et une hausse dans la moitié nord, notamment près des frontières du Nord-Est.

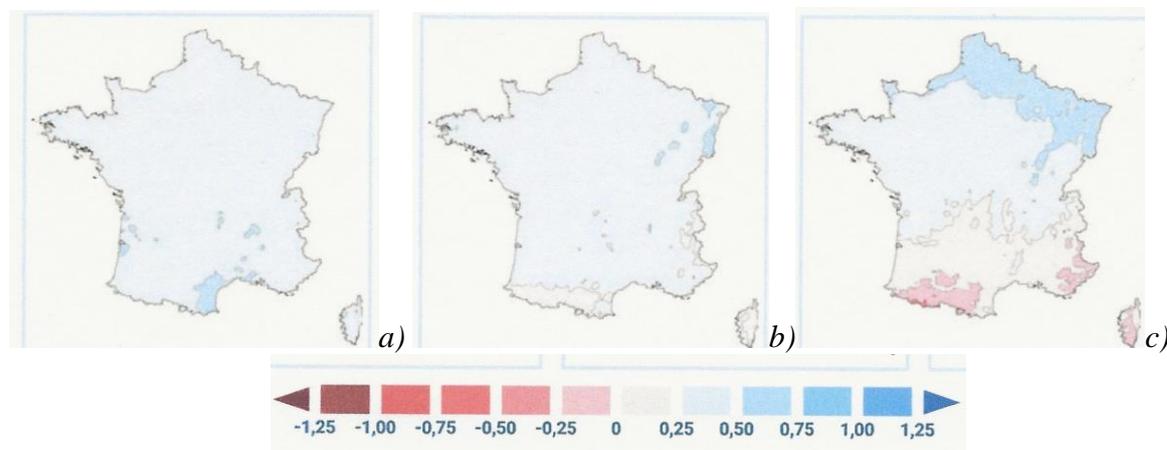


Fig. 5 – Carte des écarts de cumul annuel de précipitations (mm/jour) pour la France à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (par rapport à la référence 1976-2005) selon les scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>1</sup> : RCP 2.6 (a), RCP 4.5 (b) et RCP 8.5 (c)<sup>4</sup>

Cette évolution connaît une *forte modulation saisonnière* avec une hausse systématique en hiver, souvent supérieure à +10 % et à l'inverse, une baisse quasi systématique en été, pouvant atteindre -10 à -20 % en fin de siècle avec les scénarios RCP 4.5 et RCP8.5.

4 – Les *pluies extrêmes* (30 à 60 mm/jour) se produisent en moyenne 3 jours par an. Cependant, les épisodes méditerranéens peuvent souvent dépasser 150 mm/jour. L'intensité de ces pluies extrêmes augmente légèrement tout au long du siècle sur pratiquement tout le territoire et avec les trois scénarios RCP considérés (Fig. 6). Les régions les plus exposées sont celles de la moitié nord, notamment les frontières du Nord et Nord-Est et le littoral de la Manche.

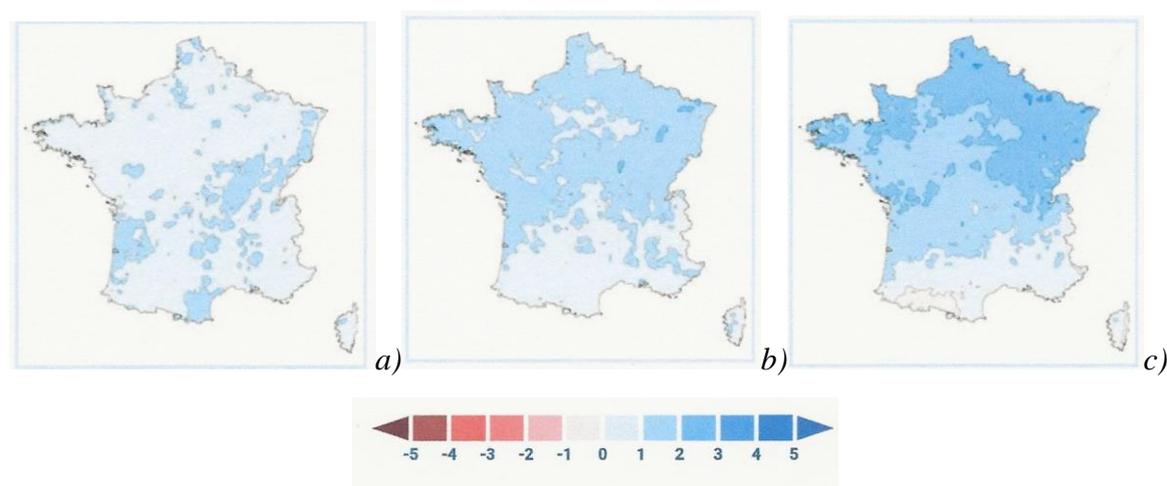


Fig. 6 – Carte des écarts en mm de l'intensité des pluies extrêmes en fin de siècle (par rapport à la référence 1976-2005) selon les scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>1</sup> : RCP 2.6 (a), RCP 4.5 (b) et RCP 8.5 (c)<sup>4</sup>

5 – La *sécheresse météorologique* est caractérisée par le nombre maximum de jours secs consécutifs en été (où les précipitations n'ont pas excédé 1 mm). Il existe par ailleurs une sécheresse

du sol et une sécheresse hydrologique (débit des rivières). Les effets du changement climatique, du fait de l'augmentation de l'évaporation due à l'augmentation des températures, sont plus intenses sur ces deux dernières.

Les simulations en fin de siècle, ne relèvent pratiquement aucune évolution des sécheresses météorologiques en RCP2.6 voire même une légère diminution. Il n'en est pas de même pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour lesquels on observe une augmentation de l'ordre de respectivement 5 jours et 10 jours. Les régions les plus concernées par ces évolutions sont celles de la moitié sud-ouest du pays, et notamment le pourtour méditerranéen, le bassin aquitain et l'Ouest de la France (Bretagne et Pays de la Loire) (Fig. 7).

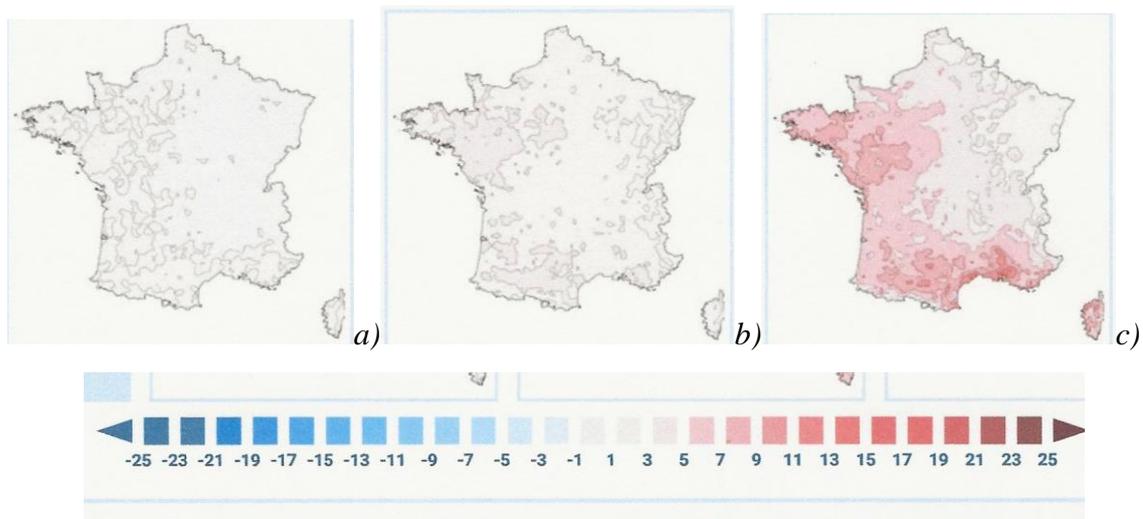


Fig. 7 – Carte des écarts du nombre de jours secs consécutifs en été (par rapport à la référence 1976-2005) selon les scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>1</sup> : RCP 2.6 (a), RCP 4.5 (b) et RCP 8.5 (c)<sup>4</sup>

La méthode des *analogues climatiques*<sup>5</sup> a été utilisée afin de définir pour Paris, parmi les climats locaux actuels, un analogue ressemblant le plus au climat attendu pour la capitale à la fin du siècle, en termes de températures et de précipitations mensuelles moyennes et annuelles totales. Ainsi, Paris pourrait avoir en 2070-2100 le climat de Bordeaux selon le modèle français Aladin ou celui de Cordoue selon le modèle anglais Hadley, les deux dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC. Dans les deux cas, les changements seraient donc très sensibles.

Enfin, un *îlot de chaleur urbain* (ICU) touche les agglomérations. Il s'explique par la conjonction de multiples facteurs : formes urbaines qui limitent la circulation de l'air et l'évacuation de la chaleur par rayonnement ; forte proportion de surfaces minéralisées et faiblesse de la couverture végétale ; forte concentration d'activités génératrices de chaleur qui s'ajoute à la chaleur naturelle ; utilisation de matériaux qui retiennent la chaleur ; etc.<sup>3</sup> L'ICU entraîne une sur-utilisation de l'air conditionné qui, bien qu'augmentant le confort intérieur, augmente la consommation d'énergie et aussi la température des rues et donc la demande de rafraîchissement.

Le phénomène d'ICU a été étudié par exemple à Paris, Dijon, Lyon, Toulouse... Ce phénomène pourrait s'ajouter aux impacts liés à une augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur : ainsi, en 2003, pendant l'épisode de canicule qui a touché l'Europe, la différence de température entre le centre de Paris et les zones rurales environnantes a atteint 8 °C<sup>6, 7, 8</sup> (Fig. 7). Cependant, une étude a montré que, pour la période 2046-2055 et dans le scénario A1B du 4<sup>ème</sup>

Rapport du GIEC, bien que la température moyenne à Paris puisse augmenter de 1,8°C, le changement climatique devrait avoir un impact neutre sur l'îlot de chaleur urbain moyen annuel<sup>9</sup>.

La végétalisation des villes, spécialement des façades et des toits ou terrasses des bâtiments culturels, dans le but de lutter contre l'ICU, devrait être une préoccupation majeure pour les Architectes des Bâtiments de France, car « *il faut éviter que la préservation de l'authenticité du bâti se confonde avec la minéralisation des espaces.* »<sup>3</sup> Cette doctrine mérite cependant beaucoup de prudence dans son application pratique, en particulier aux monuments historiques emblématiques.

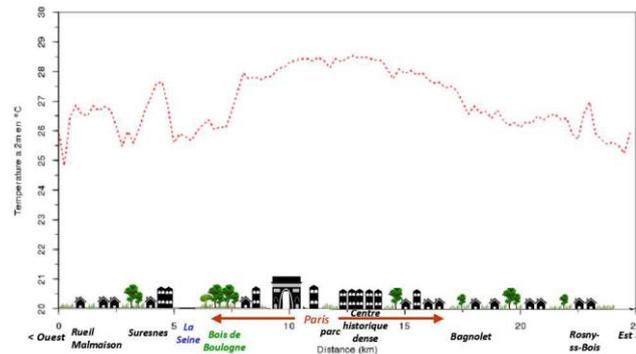


Fig. 7 - Coupe transversale de l'îlot de chaleur urbain traversant Paris lors de la canicule de l'été 2003<sup>6, 7, 8</sup>

## Références

- <sup>1</sup> GIEC, 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, Genève, 161 p.
- <sup>2</sup> Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014 : Le climat de la France au XXIe siècle, Vol. 4, *Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie*, 61 p.
- <sup>3</sup> Dantec, R., Roux, J.-Y., 2019 : Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : Urgence déclarée, *Rapport d'information au Sénat*, n° 511, 190 p.
- <sup>4</sup> DRIAS, 2020 : Les nouvelles projections climatiques de référence pour la métropole., (<http://www.drias-climat.fr/>).
- <sup>5</sup> Hallegate, S., Hourcade, J.-C., Ambrosi, P., 2007: Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas, *Climate Change*, 82, 47-60.
- <sup>6</sup> Projet EPICEA, 2008-2012 : Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne, *Programme de recherche Paris 2030*, <http://www.cnr.meteo.fr/spip.php?article271>
- <sup>7</sup> Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J-L, Masson, V., 2012 : Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate, *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-012-0521
- <sup>8</sup> Tremeac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poeuf, P., Meunier, F., 2012: Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures, *Applied Energy*, 95, 102-110.
- <sup>9</sup> Hamdi, R., Giot, O., De Troch, R., Deckmyn, A., Termonia, P., 2015 : Future climate of Brussels and Paris for the 2050s under the A1B scenario, *Urban Climate*, 12, 160-182, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.03.003>

## Evènements lents et évènements extrêmes

Pour décrire les impacts du climat sur le patrimoine culturel, il est indispensable de bien distinguer les *évènements à survenue lente* des *évènements à survenue rapide*<sup>1,2</sup> :

- *Les évènements à survenue lente* sont de longue durée, progressifs et sont potentiellement des transitions lentes peu dommageables dans le court terme, mais pouvant avoir de profondes conséquences sur le plus long terme. Ils sont la conséquence du réchauffement lent global qui entraîne la fonte des glaciers, la montée du niveau des mers, l'aridification, la désertification et des changements dans la saisonnalité et la distribution des espèces. Pour le patrimoine bâti, les interactions du changement climatique avec la pollution de l'air sont concernées (par ex. la récession/érosion des façades en calcaire et en marbre, le noircissement des surfaces en pierre, le lessivage chimique des vitraux anciens et la corrosion des métaux...) ainsi que la cristallisation des sels dans les murs poreux (par ex. pierre, brique, plâtre, mosaïques, peintures murales, etc.), la croissance des insectes nuisibles, des champignons et des plantes supérieures.

- *Les évènements à survenue rapide ou évènements extrêmes* sont de courte durée, aigus, intenses, récurrents, hautement dommageables et incontrôlables. Ils incluent les vents extrêmes, les ouragans, les typhons, les ondes de tempêtes, les précipitations extrêmes, les sécheresses extrêmes, les tempêtes de grêle, les crues subites, les glissements de terrains, les vagues de chaleur, les vagues de froid et les incendies spontanés. Le changement climatique devrait accroître la fréquence et l'intensité de certains de ces types d'évènements à travers le monde.

Ce sont surtout les *évènements extrêmes*, en particulier les vents violents, les précipitations extrêmes, les crues subites, les vagues de chaleur et les sécheresses, qui font courir un *danger majeur* au patrimoine culturel.

### Références

<sup>1</sup> Lefèvre, R.-A., 2014: The impact of climate change on slow degradation of monuments in opposition to extreme events, in *Climate Change as a Threat to Peace, Impacts on Cultural Heritage and Cultural Diversity*, von Schorlemer, S., Maus, S., Eds., Dresden Papers on Law and Policy of the United Nations, Band 19, 83-100.

<sup>2</sup> Climate Change and Cultural Heritage Working Group, 2019: *The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action*, ICOMOS, Paris, 62 p.

---

## La contribution du patrimoine culturel à la résilience des villes

La *résilience* est un concept nouveau dans les domaines de la ville et du patrimoine culturel. La Stratégie Internationale des Nations-Unies pour la Réduction des Risques <sup>1</sup> la définit comme « *La capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposés aux risques, de résister, d'absorber, d'accueillir et de corriger les effets d'un danger, en temps opportun et de manière efficace, notamment par la préservation et la restauration des structures essentielles et des fonctions de base* ». En quoi le patrimoine culturel est-il un acteur potentiel de la résilience des villes dans une situation post-crise liée au changement climatique ?

Les stress en relation avec le climat affectent les villes, qu'ils soient chroniques (changements de température et de pluviométrie, effet d'îlot de chaleur urbain, pollution atmosphérique...) et surtout aigus (inondations, tempêtes, canicules...). Le patrimoine culturel, situé au cœur de celles-ci, devrait être pris en considération dans leurs stratégies de résilience, bien que, par exemple, Paris l'ait oublié en 2017 dans sa propre stratégie <sup>2</sup>. Il peut en effet être un puissant levier dans la reconstruction sociale et économique post-crise, car il s'agit du cadre et de la qualité de vie des citoyens, et il est une motivation touristique importante avec les retombées économiques qui en découlent.

M. Reguezza, dans son livre « *Paris coule-t-il ?* » <sup>3</sup> a abordé récemment cette notion à propos des crues de la Seine : « *La résilience est une notion floue mais très à la mode dans la gestion du risque. C'est un concept importé des sciences physiques. L'étymologie du mot (du latin resiliere) renvoie à l'idée de « rebond » ... Une société qui doit faire face à une crise... est résiliente si elle est capable d'absorber un choc, d'y faire face, de maintenir son organisation et son fonctionnement, de revenir à la « normale », de se relever, de se reconstruire. Dans le meilleur des cas, la société tire les leçons du désastre. Cette capacité d'apprentissage lui permet alors de mieux anticiper les catastrophes à venir... Dans ce cadre, le retour à la normale se réduit aux opérations de reconstruction et de réparation des dommages physiques. On observe notamment une forte tendance à reconstruire à l'identique. C'est plus facile et plus rapide, car on sait faire ; c'est aussi moins coûteux dans la plupart des cas ; c'est enfin la meilleure façon de faire comme si rien ne s'était passé* ».

F. Macalister <sup>4</sup> a abordé le problème de la résilience dans le secteur spécifique du patrimoine culturel. C'est, à notre connaissance et à ce jour, l'étude la plus focalisée sur ce secteur : « *Les conservateurs et d'autres acteurs du secteur du patrimoine culturel sont dans une position unique pour aider à la récupération de la communauté dans l'éventualité d'un désastre de grande ampleur... Une réponse effective et une récupération demandent une coopération et des réseaux régionaux, nationaux et internationaux incluant les médias et les réseaux sociaux...* ».

La Charte de Rome <sup>5</sup> sur la résilience des Villes d'Art aux catastrophes naturelles comporte des points fondamentaux pour notre propos : « *Un trait caractéristique des biens culturels est qu'ils ont une valeur esthétique, historique, éducative, sociale, symbolique, scientifique et spirituelle qui, en plus de leur valeur économique, détermine la volonté du public de financer leur préservation ; les biens culturels sont authentiquement uniques et ne sont remplaçables par aucun moyen après leur perte ou leur dommage ; les Villes d'Art doivent être capables d'absorber les chocs externes sans*

*perdre leurs fonctions caractéristiques : elles doivent devenir des villes résilientes ; le succès de la phase de reconstruction dépend crucialement de la préservation des écoles de conservation/restauration ; la réduction des risques pour les collections muséales requiert une attention spéciale... ».*

Une application de la notion de résilience, sans relation établie par ses auteurs avec le dérèglement climatique, a été faite à une *ville d'art emblématique, Florence* (Italie), à la suite de son inondation par l'Arno en 1966 <sup>6,7</sup>. Dans cette étude, un modèle mathématique de résilience a associé un modèle hydrologique simulant l'inondation et un modèle de vulnérabilité et de récupération estimant le dommage physique au patrimoine culturel et la persistance temporelle des conséquences directes et indirectes. Les variables sélectionnées sur l'état du système sont le nombre de monuments ouverts au public et le nombre de visiteurs après l'inondation qui représentent une mesure de l'impact social et économique indirect sur la ville. Les résultats montrent que le modèle de résilience aide à la quantification indirecte des impacts dus à la perte d'accessibilité du patrimoine culturel et permet une évaluation de l'efficacité des mesures préventives.

En mai 2017, les Académies des Sciences des pays du G7, dont l'Académie des Sciences française <sup>8</sup>, ont fait, à l'occasion du sommet de Taormina (Sicile), une déclaration commune insistant sur des défis scientifiques majeurs. La *résilience du patrimoine culturel* aux catastrophes naturelles a été identifiée comme une priorité scientifique : *« Les Académies des Sciences insistent sur l'importance de renforcer la prise de conscience publique des spécificités de la vulnérabilité du patrimoine culturel. Elles proposent plusieurs actions et recommandations : poursuivre les recherches permettant une évaluation des risques et la prévision des diverses catégories de catastrophes naturelles ; établir des procédures a priori permettant une préparation optimale au moment où ces catastrophes surviennent ; financer convenablement les écoles de conservation/restauration du patrimoine et les faire interagir avec les centres de recherche ; faciliter le financement participatif ; renforcer la coopération internationale ».*

Toutes ces recommandations trouvent malheureusement une application immédiate dans le contexte de la *pandémie due au Corona virus* du printemps 2020. Ainsi, l'International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM, Rome) a fait le 10 avril 2020 une déclaration dont les termes pourraient aussi s'appliquer à une situation post-catastrophe liée au dérèglement climatique : *« L'ICCROM attire l'attention du monde entier sur le rôle significatif de la culture et du patrimoine culturel dans le soutien social et post-traumatique en cas de crise, en permettant la cohésion sociale et la construction de la résilience des communautés... La protection et la conservation de notre patrimoine culturel doivent figurer dans tous les plans de reprise et dans les projets de développement après la crise ».* De même, la Ville de Paris a-t-elle réactivé sa Stratégie de Résilience <sup>2</sup> dans laquelle il serait souhaitable que soit inclus un point symboliquement important pour la reconstruction de l'image et du cadre de vie des parisiens, ainsi que pour le reprise de l'activité économique liée au tourisme : la réouverture et l'accélération du chantier de restauration de la cathédrale Notre-Dame dont la charpente a brûlé le 15 avril 2019.

On comprendra que notre approche concernant la résilience du patrimoine culturel soit prudente et modeste, car c'est un domaine pratiquement inexploré, particulièrement en France. Les recherches sur les relations entre le changement climatique et le patrimoine culturel français ont en effet surtout concerné les impacts, mais très peu l'adaptation et encore moins la résilience, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité, l'exposition et l'analyse des risques.

## Références

- <sup>1</sup> UNISDR, 2009 : United-Nations International Strategy for Risks Reduction, Terminology on Disaster Risk Reduction, <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/7817>
  - <sup>2</sup> Stratégie de Résilience de Paris, 2017: Mairie de Paris, Fasc. broché, 126 p., [www.paris.fr/municipalite/action-municipale/paris-resiliente-4264](http://www.paris.fr/municipalite/action-municipale/paris-resiliente-4264)
  - <sup>3</sup> Reghezza-Zit, M., 2011 : Paris coule-t-il ? Fayard, Paris, 200 p.
  - <sup>4</sup> Macalister, F., 2015: Preparing for the future: mitigating disasters and building resilience in the cultural heritage sector, *Journal of the Institute of Conservation*, 38, 2, 115-129.
  - <sup>5</sup> Charte de Rome, 2016: Résilience des villes d'Art aux catastrophes naturelles, Académie Dei Lincei, Rome.
  - <sup>6</sup> Arrighi, C., Castelli, F., Brugioni, M., Franceschini, S., Mazzanti, B., 2016: Flood risk and cultural heritage: the case study of Florence( Italy), *European Geosciences Union*, General Assembly 2885, abstract.
  - <sup>7</sup> Arrighi, C., Castelli, F., 2020 : Flood resilience and indirect impacts in art cities, *European Geosciences Union*, General Assembly, 4852, abstract.
  - <sup>8</sup> Académie des Sciences, 2017 : Patrimoine culturel : renforcer la résilience aux catastrophes, *Déclaration au G7 réuni à Taormina*, [www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/éà&è-G7-cultural\\_heritageFR.pdf](http://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/éà&è-G7-cultural_heritageFR.pdf)
-

## Prévoir et quantifier l'évolution des dommages aux matériaux : les Fonctions Dose-Réponse

Les *Fonctions Dose-Réponse (FDR)* sont des équations exprimant quantitativement, à partir de son comportement actuel, le comportement d'un matériau placé dans un environnement nouveau et dans des conditions climatiques nouvelles, actuelles ou futures, ou même permettant de reconstruire son comportement passé. Ces notions ont été largement développées et discutées récemment <sup>1</sup>.

Les *doses* sont les paramètres influençant la réponse ; elles correspondent aux facteurs climatiques (météorologiques) et aux doses environnementales (pollution). Leur influence est différente selon les conditions d'exposition à la pluie : sèches (à l'abri de la pluie) ou humides (à la pluie). La *réponse* est une modification mesurable du matériau : corrosion, récession, noircissement, lessivage chimique, biocolonisation... L'expression générale d'une FDR est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Réponse (dommage)} = & \text{Doses sèches } (T, HR, [SO_2], [HNO_3], [O_3], [PM], t\dots) \\ & + \text{Doses humides } (Pluie, [H^+], t\dots) \end{aligned}$$

avec  $T$  : Température ;  $HR$  : Humidité Relative ;  $PM$  : matière particulaire ;  $t$  : temps.

Les FDR sont obtenues empiriquement, soit en laboratoire par exposition dans des *chambres de simulation atmosphérique* où les différentes doses sont introduites, ou plus fréquemment lors de *campagnes d'exposition sur des sites réels* ayant des paramètres environnementaux et climatiques variés qui sont mesurés tout au long de l'expérience. La durée de l'expérience  $t$  est considérée comme une dose. Seules les doses mesurées sont prises en compte, excluant toutes les autres, même si elles pourraient être de possibles causes de dommage, mais inconnues ou non mesurables au moment de l'expérience. Ces FDR ont de plus la propriété cruciale que leurs résultats sont *cartographiables*, comme le sont les facteurs climatiques et environnementaux. Une FDR, comme toute fonction empirique, n'est valable que dans des conditions identiques ou proches de celles de son élaboration : la concordance des domaines de validité des doses des FDR avec les données climatiques et de pollution doit donc être vérifiée.

Une première Fonction de dommage, assimilable à une FDR, a été établie par F. W. Lipfert <sup>2</sup> en 1989, *au cours d'expériences de laboratoire* sur la dissolution de la calcite ( $CaCO_3$ ), principal minéral des *calcaires* et des *marbres*.

Plusieurs autres FDR, concernant les *métaux* (*acier, zinc, cuivre, bronze*) et le *calcaire de Portland*, ont été obtenues à partir de *campagnes d'exposition de matériaux dans l'environnement* au cours du Programme International Coopératif « Matériaux » des Nations-Unies (1997-2001) <sup>3</sup> et du projet européen « MULTI-ASSESS » (2002-2005) <sup>4,5</sup>.

Pour ce qui concerne le matériau vitreux, une FDR exprime le *flou du verre moderne* silico-calco-sodique dû au dépôt de particules atmosphériques <sup>5</sup>, deux autres FDR expriment le lessivage chimique (lixiviation) de K et Ca des *vitraux anciens* silico-calco-potassiques <sup>6,7</sup>.

## Références

- <sup>1</sup> Camuffo, D., 2019: Microclimate for Cultural Heritage, 3<sup>rd</sup> Edition, Elsevier, 584 p.
  - <sup>2</sup> Lipfert, F.W., 1989: Atmospheric Damage to Calcareous Stones. Comparison and reconciliation of recent experimental findings, *Atmospheric Environment*, 23, 415-429.
  - <sup>3</sup> Tidblad, J., Kucera, V., Henriksen, A.A., Kreislova, K., Yates, T., 2001: UN ECE ICP Materials: dose-response functions on dry and wet acid deposition effects over 8 years of exposure, *Water, Air, Soil Pollution*, 130, 1457-1462.
  - <sup>4</sup> Tidblad, J., Kucera, V., 2007: Dose-response functions and tolerable levels for corrosion in the multi-pollutant situation, *Pollution Atmosphérique*, n° spécial « Effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux », 87-93.
  - <sup>5</sup> Tidblad, J., 2010: Dose-Response and Damage Functions for Materials in a Changing Climate, *Proceedings of the 2009 Ravello International Workshop and Strasbourg European Master-Doctorate Course*, R.-A. Lefèvre & C. Sabbioni, Ed., Edipuglia, Publ., Bari, 71-79.
  - <sup>6</sup> Ionescu, A., Lefèvre, R.-A., Brimblecombe, P., Grossi, C.M., 2012 : Long-term damage to glass in Paris in a changing environment, *Science of the Total Environment*, 431, 151-156.
  - <sup>7</sup> Melcher, M., Schreiner, M., 2007: Quantification of the influence of atmospheric pollution on the weathering of low-durability potash-lime-silica glasses, *Pollution Atmosphérique*, n° spécial « Effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux », 13-22.
-

## Un résumé du vocabulaire du patrimoine culturel face au changement climatique

On ne trouvera ci-dessous qu'un minimum de définitions des termes utilisés dans l'étude des relations entre changement climatique et patrimoine culturel. D'autres sont données au fil des pages de cette brochure. D'autres enfin, plus nombreuses et plus fournies, existent dans les glossaires complétant des publications récentes faisant référence dans le domaine <sup>1 à 6</sup>. Le lecteur pourra s'y reporter facilement.

**Adaptation** : démarche visant à réduire la vulnérabilité aux effets du changement climatique actuel ou futur en modérant les dommages ou en exploitant les potentielles opportunités bénéfiques.

**Atténuation** : intervention humaine visant à réduire les sources ou à accroître les puits de gaz à effet de serre.

**Descente d'échelle** : méthode consistant à transformer les informations des modèles et des analyses de résultats d'une échelle globale à une échelle régionale ou locale.

**Exposition** : présence de biens culturels dans des lieux où ils peuvent être affectés de façon adverse.

**Maladaptation** : action amenant à accroître le risque d'effets adverses liés au climat tels que l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre ou l'accroissement de la vulnérabilité.

**Neutralité carbone** ou **zéro émissions nettes** : principe consistant à compenser les émissions de gaz à effets de serre dans l'atmosphère : si on en émet une certaine quantité à un endroit, elle peut être compensée si on retire la même quantité de ces gaz ailleurs, par ex. en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments culturels.

**Profil représentatif d'évolution de concentration** (RCP : Representative Concentration Pathways) : évolution temporelle des émissions de gaz à effet de serre ou d'autres forçages climatiques vers un état futur.

**Résilience** : capacité à absorber les perturbations du climat en gardant les mêmes structures de base.

**Risque** : conséquences adverses potentielles des impacts du changement climatique sur les biens culturels ou des réponses humaines au changement climatique.

**Vulnérabilité** : propension ou prédisposition à être affecté par des effets adverses.

### Références

<sup>1</sup> IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press

<sup>2</sup> IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., P. Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J. (eds.).

- <sup>3</sup> IPCC, 2019: Annex I: Glossary [Weyer, N.M. (ed.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In Press
- <sup>4</sup> Climate Change and Cultural Heritage Working Group, 2019: The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action, *ICOMOS*, Paris, Glossary, 91-106.
- <sup>5</sup> Harkin, D., Hyslop, E., Johnson, H., Tracey, E., 2019: A Guide to Climate Change Impacts on Scotland's Historic Environment, *Historic Environment Scotland*, 54 p.
- <sup>6</sup> GIEC, 2013: Glossaire [Planton, S. (coord.)]. In: Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. publ.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique
-

## *2<sup>ème</sup> Partie :*

### *Les impacts potentiels*

### *du changement climatique*

### *sur le patrimoine monumental français*

### *et ses possibilités d'adaptation*

Cette 2<sup>ème</sup> Partie est une *approche qualitative et descriptive* des impacts qui, potentiellement, pourraient affecter le patrimoine culturel français métropolitain, ainsi que des possibles adaptations qui pourraient limiter les dommages résultant de ces impacts. C'est un inventaire des possibles, dressé à partir de considérations générales et de phénomènes généraux qui ne sont pas spécifiquement français. Il ne s'agit donc pas là de résultats scientifiques consolidés par des publications expertes. Ils ont l'avantage d'être généraux et assez exhaustifs, donnant ainsi des pistes pour les recherches à venir.

Les impacts potentiels du changement climatique sur le patrimoine culturel français sont synthétisés dans le *Tableau 1* pour ce qui concerne les enveloppes *extérieures* des monuments et édifices, et dans le *Tableau 2* pour l'*intérieur* des bâtiments culturels (musées, bibliothèques, réserves...), non chauffés et non climatisés, abritant les objets d'art et les collections.

Chaque tableau comporte 4 blocs horizontaux de couleur différente correspondant à chacun des *facteurs-clés d'origine climatique* : augmentation de la température globale, précipitations et humidité atmosphérique, montée du niveau des mers et combinaison du changement climatique et de la pollution de l'air.

Une colonne concerne la *vitesse d'action* de ces facteurs : lent ou extrême. Les deux colonnes suivantes concernent l'une les *modalités générales*, l'autre les *modalités spécifiques* d'impact sur le patrimoine. Enfin, la dernière colonne suggère des *actions d'adaptation, remédiation et résilience*.

Ces deux tableaux, qui sont *qualitatifs, descriptifs, subjectifs, non exhaustifs et non hiérarchisés*, ne doivent être considérés qu'à titre indicatif. Cependant, des références à des études *quantitatives* sont données lorsqu'elles existent dans la littérature scientifique.



**Tableau 1 : Impacts prévisibles du changement climatique sur les enveloppes extérieures des monuments et édifices culturels en France**

Facteur-clé d'origine climatique	Vitesse d'action	Modalités générales d'impact	Modalités spécifiques d'impact sur le patrimoine	Actions générales d'Adaptation/Remédiation/Résilience
Augmentation de la température globale	Lente	1-Influence sur la température locale estivale et hivernale moyenne - Effet d'îlot de chaleur urbain (ICU)  2-Influence sur la circulation atmosphérique et océanique  3-Influence sur les cycles de gel-dégel	1- Augmentation de la température extérieure des bâtiments -Insolation accrue des façades avec thermoclastisme -Croissance accrue de lichens, algues, champignons, plantes supérieures sur les façades -Dommages accrus aux structures en bois dus aux insectes nuisibles  2-Effets du vent : ensablement par migration des dunes continentales et côtières  3- Eclatement des matériaux poreux humides Déstabilisation des bâtiments par dégel du pergélisol en haute montagne	1-Réaliser l'isolation thermique des bâtiments culturels en respectant leur esthétique -Atténuer l'ICU par végétalisation et arrosages -Eclaircir les façades verticales et les parties horizontales pour augmenter leur albédo, par abattement de la pollution et nettoyage  2-Lutter contre l'ensablement (écrans végétaux)  3- Abriter les matériaux poreux de la pluie (séchage) -Consolider les structures déstabilisables
	Extrême	1 - Vagues de chaleur et canicules -Sécheresses extrêmes  2-Influence sur le régime des vents violents	1-Thermoclastisme important -Risque accru d'incendie des infrastructures en bois et des charpentes  2-Dommages dus aux vents violents, aux tornades et aux tempêtes	1-Protection accrue contre les incendies  2-Sécurisation des toits, volets, portes extérieures -Protection contre l'ensablement

<b>Précipitations et humidité atmosphérique</b>	<b>Lente</b>	<p>1-Augmentation de l'intensité et de la durée des précipitations</p> <p>2-Saturation des terrains en eau</p> <p>3-Pluie orientée par le vent</p> <p>4-Remontées capillaires d'eaux chargées de sels dans les murs poreux</p> <p>5-Effets de gel-dégel sur les matériaux poreux imbibés d'eau</p> <p>6-Dilatation-contraction des argiles dans les sols</p> <p>7-Action sur le bois</p> <p>8-Action sur les métaux</p>	<p>1- Inondations fluviales -Débordement des gouttières et canalisations</p> <p>2-Glislements de terrains avec destruction et ensevelissement de bâtiments</p> <p>3- Erosion accrue des façades en pierre, enduit, brique, béton</p> <p>4-Efflorescences salines et taches d'humidité à l'extérieur des murs poreux</p> <p>5-Eclatement et fissuration des matériaux en façade</p> <p>6-Déstabilisation des fondations et fissuration des murs des constructions sur sols argileux</p> <p>7-Dilatation et pourrissement du bois</p> <p>8- Rouille et corrosion des métaux</p>	<p>1- Surélévation des édifices culturels (pilotis) - Redimensionnement des gouttières et des conduits -Surélévation des installations électriques (compteurs, prises de courant) -Installation de valves anti-reflux sur les dispositifs d'évacuation des eaux</p> <p>2-Inventorier et cartographier les zones à risque de glissement de terrains et y proscrire les constructions nouvelles en particulier culturelles</p> <p>-Emploi de pierres, de bétons et d'enduits plus résistants à l'eau -Entretien régulier, ragréage</p> <p>4-Installation de drains à la base des murs</p> <p>5-Protection des matériaux poreux contre le gel : mise à l'abri de l'eau</p> <p>6-Inventorier les zones argileuses -Inventorier et consolider les structures fragilisées -Chainage des bâtiments, trottoirs anti-évaporation</p> <p>7-Protection du bois contre l'humidité</p> <p>8-Protection des métaux (peintures)</p>
	<b>Extrême</b>	<p>1 - Inondations par crues fluviales récurrentes et crues subites (flash-flows)</p> <p>2 - Inondations par ruissellement pluvial urbain en milieu artificialisé (béton, asphalte, pavés de pierre...)</p>	<p>1 - Dommages par la force des eaux, les débris, les sédiments, les apports de polluants -Impact sur les installations électriques</p> <p>2 – Débordement des systèmes de collecte et de transport des eaux pluviales</p>	<p>1 - Inventorier les zones et édifices patrimoniaux menacés par les crues fluviales et les crues subites -Isolation et surélévation des installations électriques -Installation de valves anti-reflux (évacuation des eaux) -Elaborer des plans d'intervention d'urgence en cas de crues récurrentes et subites -Identifier les sites refuges pour accueillir les biens culturels et pour les sécher et les restaurer - Consolidation des ponts historiques et des berges</p> <p>2 – Rendre perméables les sols artificialisés</p> <p>-Optimiser les dispositifs de collecte et d'écoulement des eaux pluviales -Extension des parcs et jardins urbains</p>

<b>Montée du niveau des océans</b>	<b>Lente</b>	<p>1-Erosion côtière</p> <p>2-Invasion des zones continentales par les eaux marines</p>	<p>1-Destruction de monuments, édifices et sites archéologiques sur le littoral</p> <p>2-Apports importants d'eaux chargées de sels dans les bâtiments en zone continentale et corrosion par ces sels</p>	<p>1-Inventorier les monuments, édifices, sites archéologiques et paysages culturels menacés par l'érosion des côtes</p> <p>-Retrait stratégique</p> <p>2-Inventorier les zones basses susceptibles d'invasion marine</p> <p>-Renforcer les structures de protection et d'étanchéité</p> <p>-Proscrire les constructions nouvelles non adaptées en zone littorale inondable ou instable</p> <p>-Surélévation des édifices culturels (pilotis)</p>
	<b>Extrême</b>	- Franchissement et rupture des structures de protection	- Submersion des sites culturels côtiers et insulaires	- Renforcement des structures de protection
<b>Combinaison du changement climatique et de la pollution de l'air extérieur</b>	<b>Lente</b>	<p>1-Dépôts de particules anthropiques : fly-ash et suies</p> <p>2-Altération du verre</p> <p>3-Altération des métaux</p> <p>4-Dégradation du béton</p> <p>5-Biodégradation des façades</p>	<p>1-Développement de croûtes noires gypseuses</p> <p>-Noircissement des façades par les suies</p> <p>2-Lixiviation et corrosion des vitraux</p> <p>3-Rouille et corrosion des métaux</p> <p>4-Carbonatation du ciment et corrosion des armatures</p> <p>5-Changement de couleur des façades</p>	<p>1-Abattement de la pollution atmosphérique (trafic)</p> <p>-Piétonisation des centres-villes historiques</p> <p>-Surveillance de l'environnement atmosphérique des monuments par des stations automatiques</p> <p>2-Installation de doubles verrières de protection en verre autonettoyant</p> <p>3-Protection des métaux (peintures)</p> <p>4-Formulation de nouveaux bétons et armatures</p> <p>5-Abattement de la pollution atmosphérique</p>

**Tableau 2: Impacts prévisibles du changement climatique sur l'intérieur des édifices, musées, collections, bibliothèques, archives, réserves... non chauffés et non climatisés, en France.**

Facteur-clé d'origine climatique	Vitesse d'action	Modalités générales d'impact	Modalités spécifiques d'impact sur le patrimoine	Actions générales d'Adaptation/Remédiation/Résilience
<b>Augmentation de la température globale</b>	<b>Lente</b>	1 - Influence sur la température intérieure des bâtiments - Effet d'îlot de chaleur urbain (ICU)  2-Influence sur les cycles de gel-dégel	1-Augmentation de la température dans les musées, collections, bibliothèques, réserves, archives, grottes ornées....  -Pression accrue sur les systèmes de climatisation-ventilation-humidification  -Croissance accrue du nombre et de l'activité des insectes nuisibles  -Accroissement de la dégradation chimique  2-Fissuration-écaillage des matériaux poreux humides (murs intérieurs en briques...)	1-Réaliser l'isolation thermique intérieure des bâtiments culturels en respectant leur esthétique. - Développer des modèles de l'effet des variations climatiques externes sur le microenvironnement intérieur -Adapter les systèmes de climatisation-ventilation et humidification aux variations climatiques -Amplifier l'usage de LED pour l'éclairage - Respecter le climat historique intérieur de la période de construction des bâtiments ou de réalisation des œuvres (climat historique)  2-Protéger les matériaux poreux sensibles au gel (séchage)
	<b>Extrême</b>	-Vagues de chaleur et canicules	-Température et sécheresses extrêmes dans les musées, collections, bibliothèques, réserves, archives...	-Renforcer la climatisation, l'humidification et la ventilation naturelle des locaux

<b>Précipitations et humidité atmosphérique</b>	<b>Lente</b>	<p>1-Inondations par crues fluviales récurrentes</p> <p>2-Remontées capillaires d'eaux chargées de sels à l'intérieur des murs poreux</p> <p>3 - Effets de gel-dégel sur les matériaux poreux imbibés d'eau</p> <p>4-Action sur le bois</p> <p>5-Action sur les matériaux organiques (en dehors du bois)</p> <p>6 - Action sur les métaux</p>	<p>1 – Mouillage des sols et murs intérieurs et des objets</p> <p>2 –Fissuration-écaillage des matériaux poreux (murs intérieurs en briques...)</p> <p>3 - Fissuration-écaillage des matériaux poreux humides (murs intérieurs en briques...)</p> <p>4 - Déformation et craquage des structures (charpentes) et des objets en bois (meublier, statues, objets artisanaux...)</p> <p>5 - Risque accru de moisissure du papier, des livres, des photos, polymères, textiles, œuvres d'art contemporaines...</p> <p>6 - Rouille/corrosion des métaux non protégés</p>	<p>1 – Etanchéité des issues et surélévation des objets -Relever les installations électriques</p> <p>2 - Mise à l'abri dans des sites-refuges pour séchage-restauration</p> <p>3 Action sur l'extérieur des murs poreux (drains à la base des murs)</p> <p>4 - Adaptation spéciale de la température et de l'humidité intérieures</p> <p>5 - Protection accrue des matériaux organiques</p> <p>6 - Protection des métaux</p>
	<b>Extrême</b>	<p>1-Inondations par crues fluviales récurrentes et crues subites</p>	<p>1-Efflorescences salines et taches d'humidité à l'intérieur des murs poreux -Fissuration/décollement des fresques, peintures murales, mosaïques.</p>	<p>1-Inventorier les sites à risque -Installer des ateliers de séchage-restauration des objets inondés</p>

<p align="center"><b>Montée du niveau des océans</b></p>	<p align="center"><b>Lente</b></p>	<p align="center">1-Erosion côtière</p> <p align="center">2-Invasion des zones continentales et côtières par les eaux marines</p>	<p align="center">1-Destruction des objets et collections à l'intérieur des bâtiments</p> <p align="center">2-Mouillage et cristallisation de sels sur les murs intérieurs en zone inondée</p>	<p>1- -Prévoir des sites-refuges pour évacuer les biens culturels meubles -Relocaliser les collections vers l'intérieur des terres (Retrait stratégique)</p> <p>2 - Renforcer l'étanchéité des structures -Prévoir des sites-refuges pour les biens culturels meubles -Création d'ateliers de séchage-dessalement des objets</p>
<p align="center"><b>Combinaison du changement climatique et de la pollution de l'air intérieur</b></p>	<p align="center"><b>Lente</b></p>	<p align="center">1-Changement du climat intérieur des musées, bibliothèques, collections, archives, réserves...</p> <p align="center">2-Emission de gaz à effet de serre</p> <p align="center">3-Dépôts de particules naturelles et anthropiques</p>	<p align="center">1-Diffusion accrue des polluants organiques volatils émis par les produits d'entretien des locaux et des objets</p> <p align="center">2-Chauffage et climatisation mal contrôlés</p> <p align="center">- Transport des œuvres à longue distance</p> <p align="center">-Voyages du personnel</p> <p align="center">-Utilisation massive de l'informatique</p> <p align="center">3-Empoussièrage des objets</p>	<p align="center">1-Restreindre l'usage des polluants organiques volatils -Choisir des produits d'entretien neutres</p> <p align="center">2-Renforcer les contrôles de la climatisation et du chauffage</p> <p align="center">- Réduire les distances entre musées, laboratoires et réserves</p> <p align="center">-Réduire les voyages aériens (congrès, terrain...)</p> <p align="center">-Réduire les calculs informatiques</p> <p align="center">3-Adapter les systèmes de filtration de l'air intérieur</p>

## *3<sup>ème</sup> Partie*

### *Les études des phénomènes*

#### *affectant*

#### *le patrimoine monumental français*

#### *dans le cadre du changement climatique*

Cette 3<sup>ème</sup> Partie expose les résultats de quelques études des impacts du changement climatique effectuées sur le patrimoine monumental français. Ces études sont à ce jour (2021) très restreintes et n'ont été menées par des équipes à participation française que dans 7 cas : *le noircissement-érosion des façades monumentales en pierre, le lessivage chimique des vitraux médiévaux, l'altération des métaux, la cristallisation des sels dans les murs poreux, les inondations et les étiages fluviaux, la vulnérabilité des sites archéologiques côtiers, la dendroclimatologie appliquée au patrimoine culturel*. Les façades, les vitraux, les métaux, et les inondations-étiages ont été étudiés à Paris, la problématique des sels ayant été la seule à être abordée à l'échelle du territoire métropolitain dans sa totalité. Les sites archéologiques côtiers étudiés sont situés en Basse-Normandie, Bretagne et Pays de la Loire. Les études de dendroclimatologie réalisées sur des arbres ou des poutres de monuments ont été effectuées à Fontainebleau et à Angoulême, et appliquées à Paris.



## Les façades monumentales en pierre face à la pollution de l'air et de la pluie, et au dérèglement climatique

Les façades des monuments et des immeubles haussmanniens parisiens ont fait récemment l'objet d'études en rapport avec le changement climatique ; nous les prendrons comme exemples. Ces façades ont beaucoup souffert de la pollution atmosphérique dans le passé, mais en souffrent beaucoup moins actuellement. Nous allons voir comment le changement climatique les touchera probablement d'ici à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.

Les *impacts lents de la pollution* ne sont pas répartis au hasard sur les façades car leur localisation est gouvernée par la pluie <sup>1,2</sup> (Fig. 1) :

- Dans les zones *abritées* de la pluie, les particules atmosphériques provenant essentiellement de la combustion du charbon ou du bois (dans le passé), du fioul ou de l'essence (actuellement), se déposent et peuvent être cimentées, si l'atmosphère contient du SO<sub>2</sub> en quantité importante, au sein d'une *croûte noire* centimétrique de gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O). Si les concentrations atmosphériques en SO<sub>2</sub> sont réduites, comme actuellement, les particules forment seulement une mince *pellicule grise ou noirâtre carbonée*. Dans les deux cas, il y a noircissement (ou soiling).
- Dans les zones *exposées* à la pluie, au contraire, les particules déposées entre deux pluies sont évacuées par la suivante et le substrat reste propre, clair et aucune croûte ou pellicule ne peut se développer. Il est alors érodé.

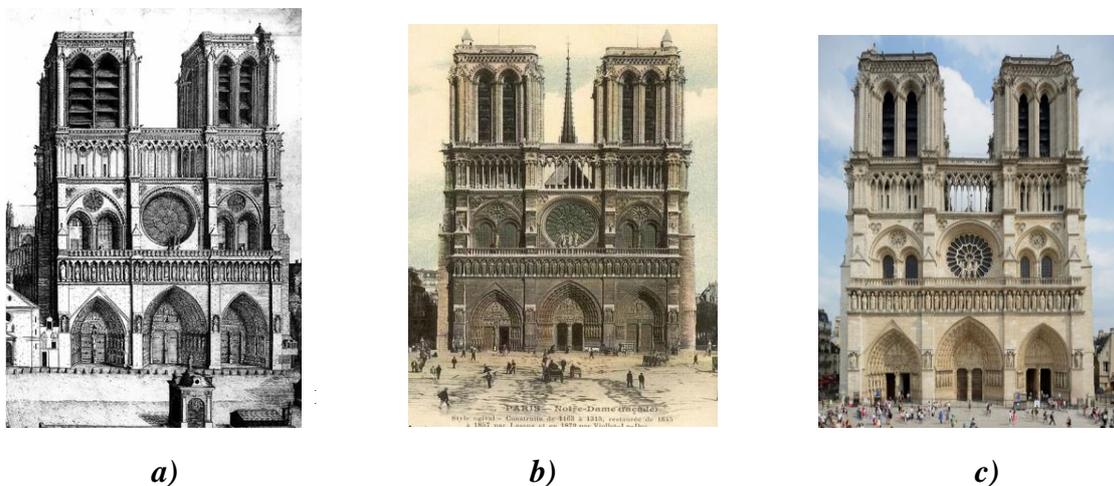


Fig. 1 – a) Notre-Dame de Paris dessinée en 1669 par Antier (Département des Estampes, Bibliothèque nationale) ; b) Vue au début du 20<sup>ème</sup> siècle, noircie par la pollution, surtout dans ses parties basses à l'abri de la pluie, alors que les parois hautes ou en relief sont plus lessivées par la pluie ; c) Vue en 2013 après une campagne de nettoyage-restauration.

La pollution atmosphérique n'est pas un phénomène nouveau à Paris puisque, depuis qu'on dispose de données fiables, c'est-à-dire depuis le 17<sup>ème</sup> siècle au moins (utilisation du bois), cette pollution n'a fait qu'augmenter, en particulier au 19<sup>ème</sup> siècle (introduction du charbon) et dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle (utilisation des dérivés du pétrole), avant de diminuer drastiquement dans la seconde moitié du même siècle. Le modèle GAINS <sup>3</sup> indique que cette diminution devrait se maintenir jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle <sup>4</sup> (Fig. 2).

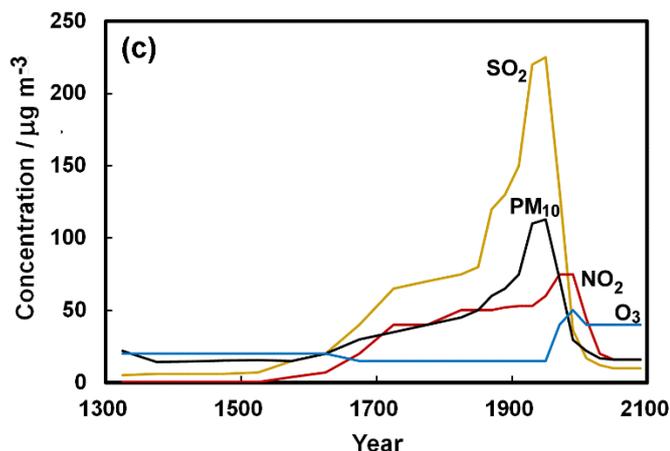


Fig. 2 - Concentrations en  $SO_2$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  et  $O_3$  dans l'air de Paris de 1300 à 2100<sup>4</sup>.

Le *noircissement de la pierre* au temps  $t$  peut s'exprimer par la mesure de son inverse, la *réflectance*  $R_t$  (rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident). Une équation relie  $R_t$  à la réflectance initiale  $R_0$  (pierre propre) et à la concentration de l'air en fines particules  $PM_{10}$  ( $<10 \mu m$ ), avec un taux de noircissement  $k_s$ <sup>5</sup> :

$$R_{t\%} = R_{0\%} \cdot \exp\left(-k_s \cdot [PM_{10}]_{\mu g \cdot m^{-3}} \cdot t_a\right)$$

Cette équation exprime clairement que le *noircissement* des façades à l'abri de la pluie dépend uniquement de la pollution particulaire et non de paramètres climatiques comme la température ou l'humidité relative de l'air.

A Paris (Fig. 3), son amélioration au 21<sup>ème</sup> siècle suit donc logiquement celle de la pollution de l'air (Fig. 2) et non celle du climat, et dépend donc uniquement des scénarios d'émission de polluants. Cependant, entre les sources et le dépôt des polluants, beaucoup de phénomènes liés à la météorologie, donc au climat, interviennent : lessivage des gaz et des particules de l'atmosphère par la pluie, dispersion par le vent...

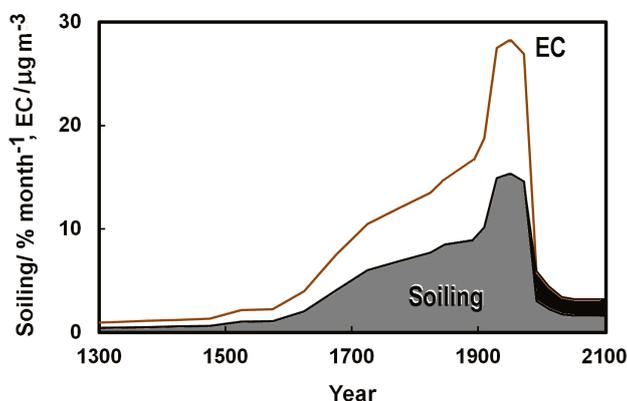


Fig. 3 – Evolution du noircissement mensuel (Soiling % per month) des façades en calcaire abritées de la pluie de 1300 à 2100 à Paris selon l'équation ci-dessus, à partir de données historiques, d'enregistrements

actuels et des sorties du modèle GAINS<sup>3</sup> d'émissions de polluants.  $EC \mu\text{g m}^{-3}$ : concentration en carbone élémentaire. La zone ombrée montre l'accroissement des PM10 dans les rues à fort trafic<sup>4</sup>.

Deux Fonctions Dose-Réponse expriment la récession-érosion du calcaire. La première est celle de F.W Lipfert<sup>6</sup> obtenue au cours d'expériences de laboratoire sur la dissolution de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), principal composant des calcaires et des marbres :

$$\text{Récession } \mu\text{m a}^{-1} = 18,8 \text{ Pluie } \text{m a}^{-1} + 0,016 [\text{H}^+] \mu\text{mol l}^{-1} \text{Pluie } \text{m a}^{-1} + 0,18 (V_{\text{dS}} \text{ cm s}^{-1} [\text{SO}_2] \mu\text{g m}^{-3} + V_{\text{dN}} \text{ cm s}^{-1} [\text{HNO}_3] \mu\text{g m}^{-3})$$

Le premier facteur de l'équation de Lipfert représente l'action des pluies « propres » (effet karst), le second l'action des pluies acides et les troisième et quatrième l'action du dépôt acide sec ( $V_{\text{dS}}$  et  $V_{\text{dN}}$  étant respectivement la vitesse de dépôt de  $\text{SO}_2$  et  $\text{HNO}_3$ ). Cette équation met en évidence que l'érosion-récession des façades en calcaire ou en marbre dépend à la fois de facteurs climatiques (pluies propres) et de pollution (pluies acides, dépôts secs de  $\text{SO}_2$  et  $\text{HNO}_3$ ).

La récession-érosion du calcaire est aussi exprimée par une seconde Fonction Dose-Réponse, celle du Programme International Coopératif des Nations-Unies sur les Matériaux (ICP-Materials)<sup>7</sup> obtenue au cours de campagnes d'exposition sur des sites réels actuels :

$$\text{Récession } \mu\text{m} = 2,7 [\text{SO}_2]^{0,48} \mu\text{g.m}^{-3} \exp(-0,018T) t^{0,96} + 0,019 \text{ Pluie } \text{mm} [\text{H}^+]_{\text{mg.l}^{-1}} t^{0,96} \text{ a}$$

La récession-érosion des façades en calcaire à Paris (Fig. 4) suit, comme le noircissement, une évolution similaire à celle de la pollution (Fig. 2), mais elle est de plus influencée par celle du climat. Elle a été maximum au 20<sup>ème</sup> siècle, suivie d'une spectaculaire décroissance en relation avec la décroissance de la pollution et de l'acidité des pluies. A la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, elle devrait croître à nouveau, mais lentement, selon l'équation de Lipfert et le scénario RCP8.5, à cause de l'accroissement de la température et des concentrations atmosphériques en  $\text{CO}_2$  qui augmenteront l'acidité des pluies, elles-mêmes en augmentation lorsqu'elles seront intenses, surtout dans le Nord de la France.

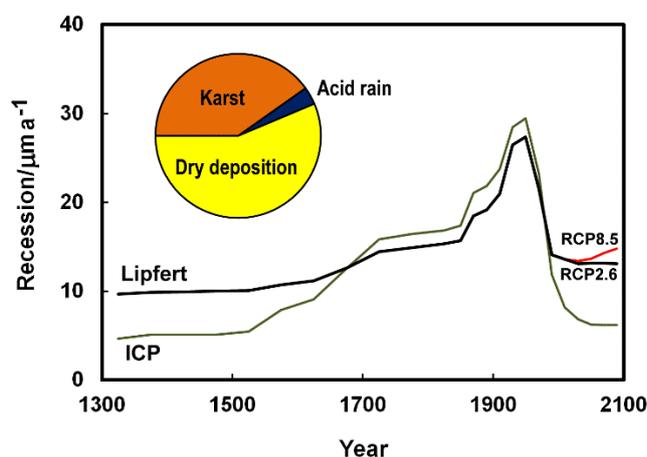


Fig. 4 – Evolution de la récession annuelle (en  $\mu\text{m}$ ) des façades en calcaire exposées à la pluie de 1300 à 2100 à Paris<sup>4</sup> selon les FDR de Lipfert<sup>6</sup> en noir et d'ICP-Materials<sup>7</sup> en rouge, en utilisant des données historiques, des relevés actuels et des valeurs calculées pour le 21<sup>ème</sup> siècle avec les modèles Aladin-Climat et GAINS, dans les scénarios RCP2.6 et 8.5 du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC.

Le changement de couleur de la pierre des façades des monuments dans le contexte du changement climatique a déjà été abordé<sup>9, 10</sup>. Ce changement de couleur et de luminosité dans les

environnements urbains, quoique traditionnellement vu comme régi par la pollution atmosphérique, peut en effet être aussi affecté par le climat et son changement. Dans le passé, les immeubles furent noircis par les suies de bois et de charbon, puis de fioul et d'essence, mais actuellement de nouveaux polluants riches en composés organiques amènent les immeubles à prendre des tons plus chauds. De plus, la plus grande fréquence des événements pluvieux intenses, portés et orientés par le vent, change la distribution des dommages sur les façades et les climats plus chauds peuvent favoriser la colonisation biologique sur les immeubles en pierre. La couleur, la distribution des dépôts et les croissances biologiques sur les façades ont des implications esthétiques importantes et peuvent demander le nettoyage des surfaces.

Le *Plan Climat-Energie*<sup>11</sup> et la *Stratégie de Résilience de Paris*<sup>12</sup> n'ont pas pris en considération le patrimoine culturel de la capitale française, pourtant considérable et inscrit en grande partie sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. Seul le premier plan évoquait dans sa version initiale (2007) le problème de la réhabilitation du patrimoine existant : « *Dans les constructions anciennes, il y a la difficulté de réaliser une isolation par l'extérieur, les façades de Paris pouvant être difficilement modifiées à la fois pour des raisons esthétiques et du fait de leur complexité* ». De même, il était suggéré de « retraiter » les toitures en zinc, éléments essentiels du patrimoine parisien. La peinture en blanc des façades a été une idée rejetée, car elle altérerait trop l'image traditionnelle de la capitale. Enfin, il faut noter l'effort de la municipalité parisienne pour introduire « *la nature en ville* », bien qu'une végétalisation des façades et des toits des édifices culturels doive être faite avec la plus grande retenue afin de ne pas altérer leur histoire et leur esthétique.

En conclusion, bien que les façades des monuments et immeubles en calcaire du cœur historique de Paris aient eu à souffrir de la pollution atmosphérique dans le passé, leur situation s'est incontestablement améliorée ces dernières décennies. Le dérèglement climatique n'aura d'effet probable que sur leur érosion par la pluie à la fin du siècle. Ceci est en accord avec les conclusions extrapolées des cartes du Projet Noah's Ark<sup>8</sup> : la récession des façades en calcaire et en marbre à la pluie devrait être stable ou en légère décroissance ( $-1\mu\text{m}/\text{an}$ ) dans le futur proche (2010-2039) dans l'ensemble de la France, et être en plus grande décroissance ( $-2$  à  $-4\mu\text{m}/\text{an}$ ) dans sa partie méridionale dans le futur lointain (2070-2099) (*Fig. 5*).

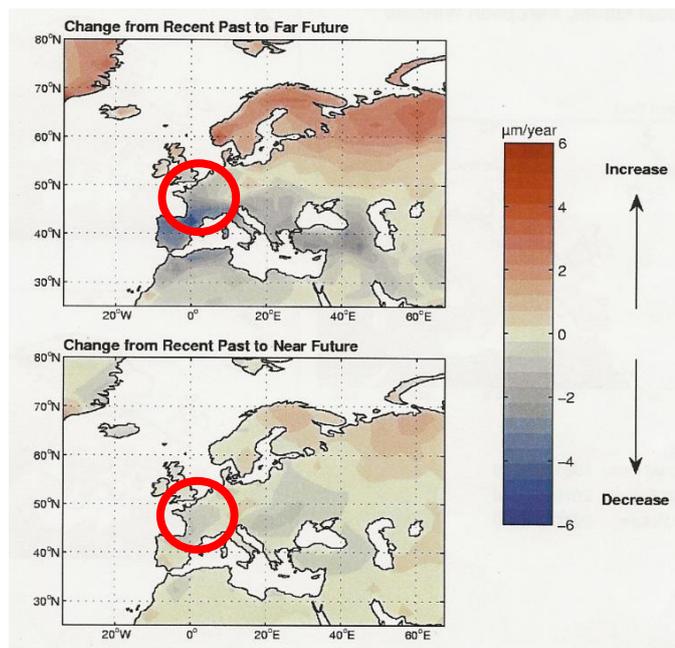


Fig.5 – Evolution de la récession des façades en calcaire en Europe et en France entre, en bas, le passé récent (1961-1990) et le futur proche (2010-2039), et, en haut, le passé récent et le futur lointain (2070-2099), selon le modèle anglais HadRM3 dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC, cartographiés dans le projet Noah's Ark<sup>8</sup>

## Références

- <sup>1</sup> Camuffo, D., Del Monte M., Sabbioni C., 1983: Origin and growth mechanisms of the sulfated crusts on urban limestone, *Water Air Soil Pollut*, 19:351-359.
- <sup>2</sup> Lefèvre, R.-A., Ionescu, A., Desplat, J., Kounkou-Arnaud, R., Perrussel, O., Languille, B., 2016: Quantification and mapping of the impact of the recent air pollution abatement on limestone and window glass in Paris, *Environmental Earth Sciences*, 75, 1359-1371.
- <sup>3</sup> GAINS: The Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies, <http://gains.iiasa.ac.at>
- <sup>4</sup> Brimblecombe, P., Lefèvre, R.-A., 2021: Weathering of materials at Notre-Dame from changes in air pollution and climate in Paris, 1325-2090, *Journal of Cultural Heritage*, 50, 88-94.
- <sup>5</sup> Brimblecombe, P., Grossi C.M., 2009: Millenium-long damage to building materials in London, *Science of the Total Environment*, 407, 1354-1361.
- <sup>6</sup> Lipfert, F. W., 1989: Atmospheric Damage to Calcareous Stones. Comparison and reconciliation of recent experimental findings, *Atmospheric Environment*, 23, 415-429.
- <sup>7</sup> Kucera V., J. Tidblad, K. Kreislova, D. Knotkova, M. Faller, D. Reiss, R. Snethlage, T. Yates, J. Henriksen, M. Schreiner, M. Melcher, M. Ferm, R-A. Lefevre and J. Kobus, 2007. UN/ECEICP materials: Dose-response functions for the multi-pollutant situation. *Water Air Soil Poll.* 7, 249-258.
- <sup>8</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.
- <sup>9</sup> 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), Geological Society, London, Special Publications, 271, 117-130.
- <sup>10</sup> Bonazza, A., Brimblecombe, P., 2014: Climate and the changing appearance of buildings, *Cultural Heritage from Pollution to Climate Change*, Edipuglia, Publ., 27-34
- <sup>11</sup> Plan Climat Energie de Paris, 2018 : Mairie de Paris, 100 p. [www.planclimatdeparis.fr](http://www.planclimatdeparis.fr)
- <sup>12</sup> Stratégie de Résilience de Paris, 2017: Mairie de Paris, 126 p., [www.paris.fr/municipalite/action-municipale/paris-resiliente-4264](http://www.paris.fr/municipalite/action-municipale/paris-resiliente-4264)

On terminera cet exposé du comportement des **façades monumentales face à la pollution de l'air et au changement climatique** par des recommandations de *mesures d'adaptation et de remédiation* spécifiques :

- Abaisser la *pollution atmosphérique* due pour l'essentiel au trafic automobile et créer ou élargir les *zones piétonnes* autour des monuments et dans le centre historique des villes ;
- Réduire l'effet d'*îlot de chaleur urbain* par des arrosages réguliers en période de canicule. L'augmentation de l'albédo des façades (par des nettoyages réguliers) et des chaussées (par des revêtements clairs) ainsi qu'une végétalisation sont des solutions plus pérennes ;
- Contrôler en continu la qualité de l'air autour des monuments en installant des *stations automatiques de surveillance* de l'environnement pour mesurer et enregistrer les paramètres météorologiques (température, précipitations, humidité relative de l'air, vent...) et de pollution (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, particules fines et ultra-fines...).

D'autres mesures spécifiques concernant les impacts qui seront développés plus loin dans cette brochure et qui concernent aussi les façades monumentales sont regroupées ici :

- Protéger les parties basses des façades des inesthétiques et destructrices *remontées capillaires d'eau chargée de sels*, en installant systématiquement des drains au pied des murs poreux ;
- Protéger les matériaux poreux contre les cycles de *gel-dégel* : pierre, mortiers, revêtements, brique...en évitant leur mouillage en période de gel ;
- Protéger sélectivement le verre des façades et des vitrages de la salissure, en utilisant des *verres autonettoyants* lors de la construction ou lors des réparations-remplacements ;
- Installer des *doubles verrières* protectrices en verre autonettoyant sur les *vitraux* ;
- Protéger les *métaux* par un entretien régulier (peinture, revêtements anti-oxydants...) ;
- Renforcer les *toits* et les *cheminées* contre les vents violents et les tempêtes ;
- Redimensionner les *gouttières* et les *conduits d'évacuation des eaux* pour faire face aux précipitations importantes.
- Couvrir les *cours intérieures* des édifices par des verrières qui réduiraient de 40% les surfaces des bâtiments exposées à l'air extérieur.

## Les vitraux anciens face à la pollution de l'air et de la pluie, et au changement climatique

A notre connaissance, en France, seuls les vitraux de la Sainte-Chapelle de Paris ont fait l'objet de recherches concernant leur dégradation dans le cadre du dérèglement climatique.

La Sainte-Chapelle de Paris, construite au 12<sup>ème</sup> siècle au cœur de la capitale, dans l'Île de la Cité, a conservé toute sa vitrerie d'origine, malgré les restaurations du 19<sup>ème</sup> siècle <sup>1</sup> (Fig. 1 a), Elle a fait récemment l'objet de travaux importants : les vitraux anciens ont été reculés vers l'intérieur de l'édifice et une structure neuve en acier inoxydable a été posée à l'extérieur pour recevoir des verrières protectrices en verres auto-nettoyants (Fig. 1 b). Cette chapelle a été un des sites d'expérimentation du Projet européen VIDRIO sur la protection des vitraux par des doubles-verrières <sup>2</sup>.



a)



b)

Fig. 1 – a) Les verrières de la Sainte-Chapelle de Paris ; b) Structure en acier inoxydable pour l'installation de doubles-verrières de protection des vitraux.

Ses vitraux, de composition silico-calco-potassique, sont très altérables du fait de leur forte teneur en potassium. Dans leurs parties *abritées de la pluie*, ils se sont recouverts de croûtes noires gypseuses lorsque la pollution soufrée était importante à Paris (Fig. 2). Dans leurs parties *exposées à la pluie ou entre deux pluies* leur altération par l'eau liquide ou par l'humidité atmosphérique peut se mesurer par la profondeur de lessivage chimique (lixiviation) des ions  $K^+$  et  $Ca^{2+}$  <sup>3</sup>. Le lessivage superficiel de K et Ca aboutit à la formation d'une couche de gel de silice hydratée à la surface du vitrail qui joue un rôle protecteur. Cette lixiviation se produit en pH acide ; en pH basique, le réseau de la silice est détruit et le verre est corrodé ponctuellement et des cratères se forment (Fig. 3).

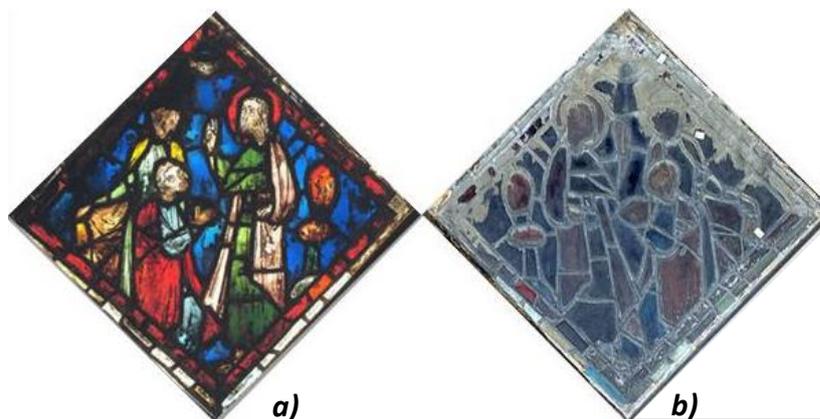


Fig. 2 - Le vitrail de Saint Jean Baptiste, dans la Saint-Chapelle de Paris, avant sa restauration, avait perdu une grande part de sa transparence initiale (a) du fait du développement sur sa face externe (b) d'une croûte gypseuse contenant des particules atmosphériques.

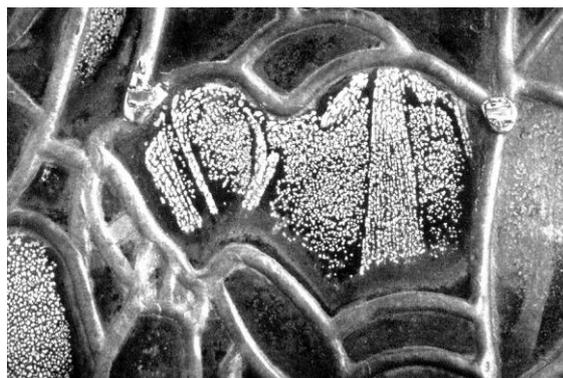


Fig. 3 – Corrosion ponctuelle en micro-cratères sur un vitrail.

L'évolution, en fonction du temps  $t_a$ , de la profondeur  $d$  de lixiviation des vitraux médiévaux à Paris depuis 1500 jusqu'en 2100 a été reconstruite pour le passé et projetée pour l'avenir sur la base de l'évolution des paramètres climatiques ( $HR\%$ : Humidité Relative de l'air ;  $T_{\circ C}$ : Température) et de pollution atmosphérique ( $SO_2$ ,  $NO_2$ )<sup>4,5</sup> en appliquant les Fonctions Dose-Réponse suivantes<sup>3</sup>:

$$d(K)_{\mu m} = -0,64 + (0,03 \cdot HR\% + 0,04 \cdot [SO_2]_{\mu g.m^{-3}}) \cdot \sqrt{t_a} - (0,05 \cdot T_{\circ C} + 2,03 \cdot [NO_2]_{\mu g.m^{-3}}^{-1}) \cdot t_a$$

$$d(Ca)_{\mu m} = -0,79 + (0,03 \cdot HR\% + 0,03 \cdot [SO_2]_{\mu g.m^{-3}}) \cdot \sqrt{t_a} - (0,04 \cdot T_{\circ C} + 1,91 \cdot [NO_2]_{\mu g.m^{-3}}^{-1}) \cdot t_a$$

Cette évolution a été projetée au 21<sup>ème</sup> siècle en utilisant soit le modèle Hadley HadRM3 dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>4</sup>, soit le modèle Aladin-Climat dans les scénarios RCP2.6 et 8.5 du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC<sup>5</sup>. Le lessivage de K et Ca sera pratiquement le même selon chacun

des scénarios RCP2.6 et 8.5, -(Fig. 4). La décroissance observée à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle a atteint des valeurs très faibles, surtout du fait de l'abatement de la pollution atmosphérique. Mais les facteurs climatiques (HR, T) maintiendront une lixiviation non nulle au 21<sup>ème</sup> siècle, ce qui montre que les vitraux continueront d'être vulnérables à Paris et que leur protection par des doubles vitrages restera une nécessité.

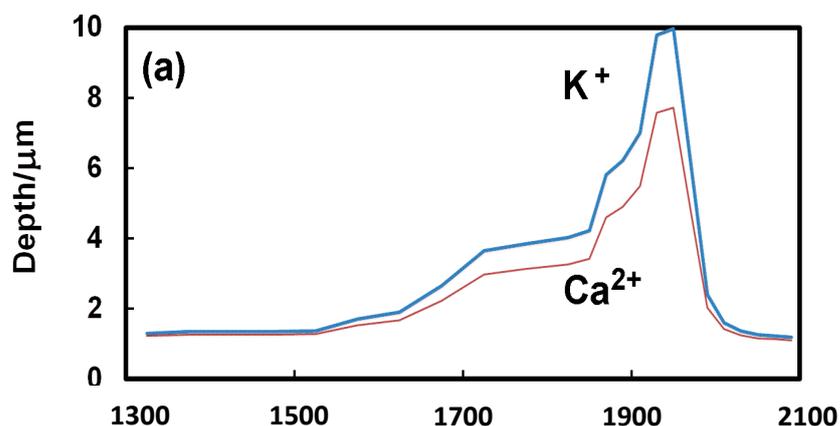


Fig. 4 – Profondeurs de lessivage de K et de Ca (en  $\mu\text{m}$ ) sous la surface d'un verre de vitrail neuf, de composition Si-Ca-K, la première année d'exposition à Paris abrité de la pluie de 1300 à 2100, en utilisant des données historiques, des relevés actuels et, pour le 21<sup>ème</sup> siècle, les modèles Aladin-Climat et GAINS dans les scénarios RCP2.6 et 8.5 du GIEC<sup>5</sup>.

Ces projections faites pour les vitraux à Paris coïncident bien avec celles que l'on peut extrapoler pour l'ensemble de la France à partir des cartes dessinées à l'échelle européenne dans le projet Noah's Ark<sup>6</sup> (Fig. 5). Ainsi, dans le futur proche (2010-2039) l'épaisseur annuelle de verre lixivié serait de 0 à 0,1  $\mu\text{m}$  inférieure à celle du passé récent (1961-1990) et, dans le futur lointain (2070-2090), de 0,3 à 0,5  $\mu\text{m}$  inférieure. Il s'agit bien d'une décroissance générale de la vulnérabilité du verre des vitraux médiévaux dans le futur, mais pas d'une annulation totale.

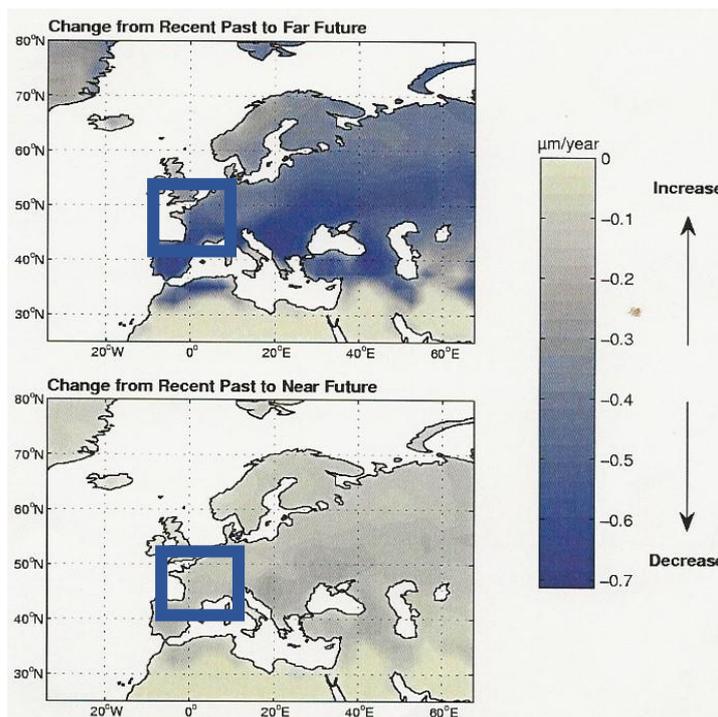


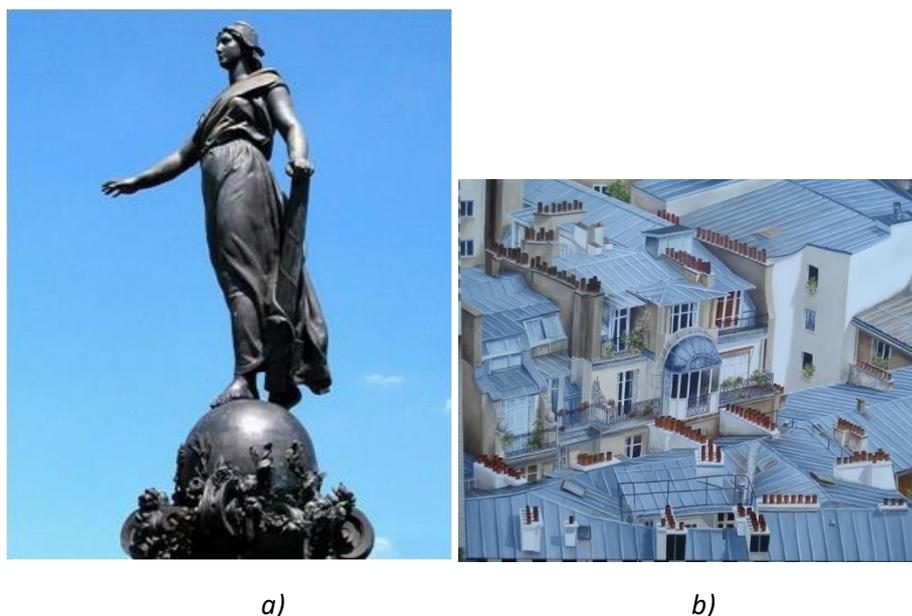
Fig. 5 - Evolution de l'épaisseur de lixiviation du verre médiéval Si-Ca-K en Europe et en France entre, en bas, le passé récent (1961-1990) et le futur proche (2010-2039), et, en haut, le passé récent et le futur lointain (2070-2099), selon le modèle anglais HadRM3 dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC, cartographiés dans le projet Noah's Ark <sup>6</sup>

## Références

- <sup>1</sup> Pallot-Frossard, I., 2017: Les conclusions du programme européen Vidrio sur la protection des vitraux par verrière extérieure, *Monumental*, 114-123.
- <sup>2</sup> Bernardi, A., Becherini, F., Verità, M., Ausset, P., Bellio, M., Brinkmann, U., Cachier, H., Chabas, A., Deutsch, F., Etcheverry, M.P., Geotti Bianchini, F., Godoi, R. H.M., Kontozova-Deutsch, V., Lefèvre, R., Lombardo, T., Mottner, P., Nicola, C., Pallot-Frossard, I., Rölleke, S., Römich, H., Sommariva, G., Vallotto, M., Van Grieken, R., 2013: Conservation of stained glass windows with protective glazing: Main results from the European VIDRIO research programme, *Journal of Cultural Heritage* 14, 527-536.
- <sup>3</sup> Melcher, M., Schreiner, M., 2007: Quantification of the influence of atmospheric pollution on the weathering of low-durability potash-lime-silica glasses, *Pollution Atmosphérique*, n° spécial « Effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux », 13-22.
- <sup>4</sup> Ionescu, A., Lefèvre, R.-A., Brimblecombe, P., Grossi, C.M., 2012 : Long-term damage to glass in Paris in a changing environment, *Science of the Total Environment*, 431, 151-156.
- <sup>5</sup> Brimblecombe, P., Lefèvre, R.-A., 2021: Weathering of materials at Notre-Dame from changes in air pollution and climate in Paris, 1325-2090, *Journal of Cultural Heritage*, 50, 88-94.
- <sup>6</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.

## Les métaux du patrimoine culturel français dans le changement climatique

Les métaux sont omniprésents dans le patrimoine culturel français, soit dans la statuaire et les objets d'art, soit dans les constructions. Deux exemples parisiens illustrent bien cela (*Fig. 1*), sans compter la Tour Eiffel, qui cependant est peinte, et les toits en plomb comme ceux de Notre-Dame de Paris et de la Sainte-Chapelle.



*Fig. 1 – a) Statue en bronze « Le Triomphe de la République », Place de la Nation, à Paris, b) Les toits en zinc de Paris font partie du paysage de la capitale.*

La statue en bronze « *Le Triomphe de la République* », Place de la Nation, à Paris (*Fig. 1a*), œuvre de Dalou, fut érigée en 1889. Elle a fait l'objet d'une restauration à l'occasion du bicentenaire de la Révolution française en 1989. Exposée à la pollution atmosphérique de la capitale, elle montre en surface des encroûtements millimétriques verts (par altération du cuivre du bronze à la pluie) et noirs (par dépôt de particules cimentées par du gypse dans les parties abritées de la pluie)<sup>1</sup>.

Les *toits en zinc* (et en moindre nombre en ardoises) sont une partie intégrante du paysage parisien au point que certains voudraient les voir inscrits en tant que tels sur la Liste de l'UNESCO. Ils couvrent une surface considérable et demandent un entretien régulier (une restauration tous les 40 ans). L'adoption de ce métal comme couverture date de la période haussmannienne du fait de sa légèreté et de la relative facilité de son travail qui permettent l'économie de charpentes importantes et rendent donc logeable le dernier voire les deux derniers étages des immeubles (chambres dites « de bonnes ») (*Fig. 1b*).

Des *Fonctions Dose-Réponse* existent pour la plupart des métaux<sup>2, 3, 4</sup>. Elles mettent en relation la *perte de masse* avec les différents *facteurs climatiques* (Température (T), Humidité relative (HR), quantité de pluie) et les *facteurs environnementaux* (concentration en SO<sub>2</sub>, en HNO<sub>3</sub>, dépôt de particules PM10, acidité des pluies H<sup>+</sup>).

La plupart des métaux ont une corrosion maximum autour de 10°C dans l'atmosphère : à des températures plus basses la corrosion augmente avec la température à cause de l'augmentation du temps de mouillage par la pluie, tandis qu'à des températures plus élevées la corrosion décroît à cause de l'évaporation plus rapide.

Les pertes de masse pour chacun des métaux s'expriment ainsi en fonction du temps :

$$\text{-pour le zinc : Perte de masse}_{g.m-2} = 1,82 + \{1,71 + 0,471[SO_2]^{0,22} \mu g m^{-3} e^{0,018HR+f(T)} + 0,041 \text{ Pluie}_{mm.an-1} [H^+]_{mg.l-1} + 1,37[HNO_3]_{\mu g m^{-3}}\} t^{0,6}_a$$

$$\text{avec } f(T) = 0,062(T-10) \text{ quand } T < 10^\circ C, \text{ sinon : } -0,021 (T-10)$$

$$\text{-pour le cuivre : Perte de masse}_{g.m-2} = 3,12 + \{1,09 + 0,00201[SO_2]^{0,4} \mu g m^{-3} [O_3]_{\mu g m^{-3}} HR_{60} e^{f(T)} + 0,0878 \text{ Pluie}_{mm.an-1} [H^+]_{mg.l-1}\} t_a$$

$$\text{avec } f(T) = 0,083(T-10) \text{ quand } T < 10^\circ C, \text{ sinon : } -0,032(T-10)$$

$$\text{-pour l'acier : Perte de masse}_{g.m-2} = 29,1 + \{21,7 + 1,39[SO_2]^{0,6} HR_{60} e^{f(T)} + 1,29 \text{ Pluie}_{mm.an-1} [H^+]_{mg.l-1} + 0,593 PM10_{g m^{-2}a^{-1}}\} t^{0,6}_a$$

$$\text{avec } f(T) = 0,15 (T-10) \text{ quand } T < 10^\circ C, \text{ sinon : } -0,054 (T-10)$$

$$\text{-pour le bronze : Perte de masse}_{g.m-2} = 1,33 + \{0,00876[SO_2] HR_{60} e^{f(T)} + 0,0409 \text{ Pluie}_{mm.an-1} [H^+]_{mg.l-1} + 0,0380 PM10_{g m^{-2}a^{-1}}\} t_a$$

$$\text{avec } f(T) = 0,06(T-11) \text{ quand } T < 11^\circ C, \text{ sinon : } -0,067(T-11)$$

L'évolution de l'altération des métaux dans l'atmosphère parisienne, de 1300 à 2100, a été établie, dans le cadre d'une étude sur Notre-Dame après l'incendie du 19 avril 2019<sup>5</sup>. La perte de masse de l'acier devrait retrouver ses valeurs pré-industrielles à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Fig. 2a), Le bronze (Fig. 2b) suit une évolution semblable mais avec des taux de corrosion plus faibles. La corrosion du cuivre (Fig. 2b) est plus sensible à l'ozone, donc elle augmente avec l'ensoleillement et avec les composés organiques volatiles. Le zinc suit une évolution semblable aux autres métaux (Fig. 2c) avec cependant un pic moins prononcé au 20<sup>ème</sup> siècle car il est moins sensible au SO<sub>2</sub>.

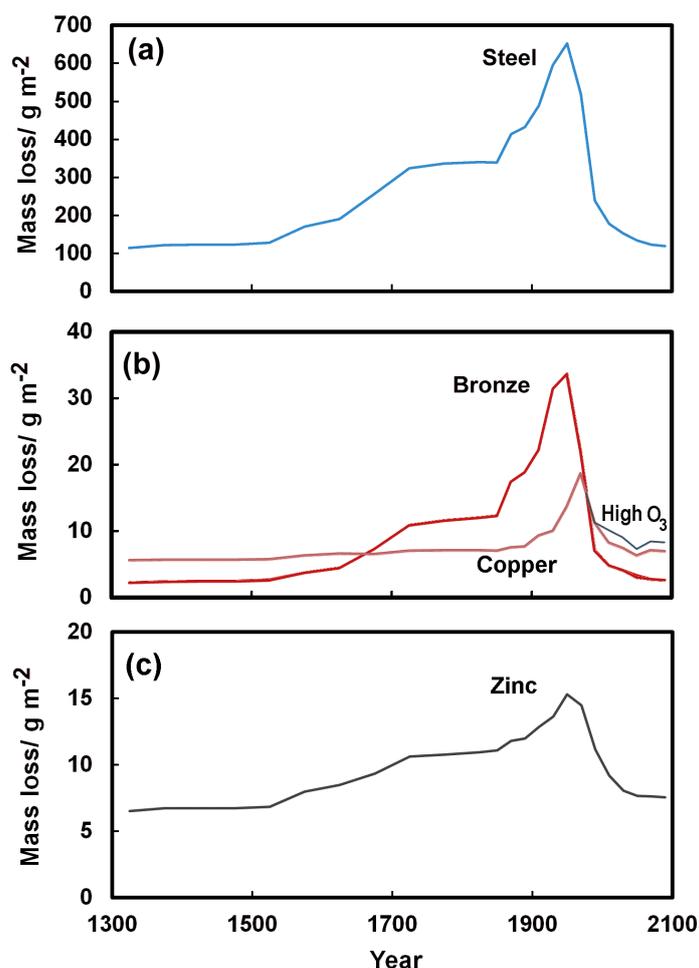


Fig. 2 – Evolution des métaux dans l’atmosphère parisienne de 1300 à 2100, en utilisant des données historiques, des relevés actuels, les Fonctions dose-réponse et, pour le 21<sup>ème</sup> siècle, les modèles Aladin-Climat et GAINS dans les scénarios RCP2.6 et 8.5 du GIEC <sup>5</sup>.

Aucune FDR n’existe pour le *plomb* qui, pourtant, est omniprésent dans le patrimoine culturel bâti : toits, flèches et dômes (Notre-Dame de Paris, Sainte-Chapelle, Panthéon, Invalides...), dans les scellements des pierres et des agrafes en fer, les fontaines et sculptures, les tuyauteries et peintures anciennes... Sa corrosion atmosphérique contemporaine a été récemment étudiée en région parisienne sur des sites expérimentaux non-patrimoniaux <sup>6</sup>.

Le projet Noah’s Ark <sup>7</sup> a dessiné à l’échelle européenne des cartes de répartition de la corrosion annuelle des métaux avec le modèle HadRM3 dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC (Fig. 3), en utilisant les Fonctions Dose-Réponse développées ci-dessus. On peut en extrapoler des données pour la France.

Pour le *zinc* (Fig. 3a), on note, contrairement à ce qui a été établi à Paris <sup>5</sup> (Fig. 2c), une faible augmentation de la corrosion (0 à 0,5  $\mu\text{m}/\text{an}$ ) dans le futur proche et une un peu plus forte (0,5 à 1  $\mu\text{m}/\text{an}$ ) dans le futur lointain. Le *cuivre* et le *plomb* suivent les mêmes tendances mais moins prononcées.

Pour l'*acier* (Fig. 3b), on observe une décroissance de la corrosion (0 à -5  $\mu\text{m}/\text{an}$ ) dans le futur proche et une plus forte décroissance dans le futur lointain (-5 à -10  $\mu\text{m}/\text{an}$ ) en accord avec ce qui est projeté à Paris<sup>5</sup> (Fig. 2a). Le *fer* et le *bronze* suivent les mêmes tendances.

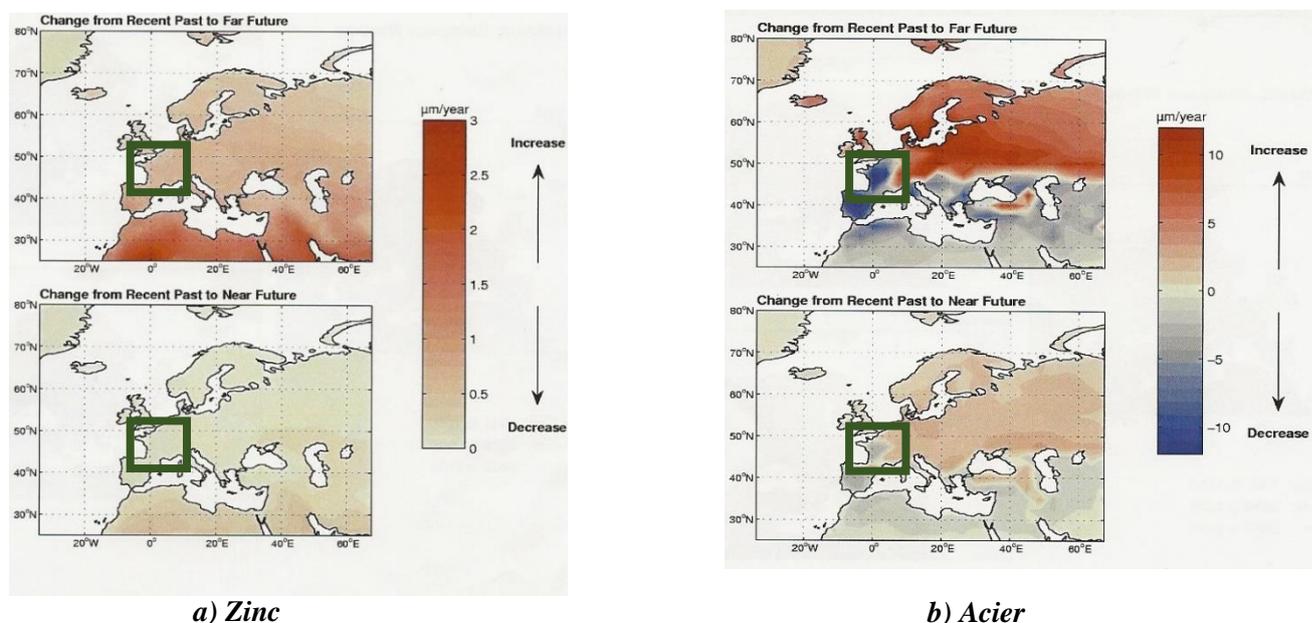


Fig. 3 - Evolution de la corrosion des métaux en Europe et en France entre, en bas, le passé récent (1961-1990) et le futur proche (2010-2039), et, en haut, le passé récent et le futur lointain (2070-2099), selon le modèle anglais HadRM3 dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC, cartographiés dans le projet Noah's Ark<sup>7</sup>

## Références

- <sup>1</sup> Amarger, A., Ausset, P., Dubos, A., Philippon, J., 1989 : Restauration du groupe de bronze de J. Dalou « Le Triomphe de la République », AARAFU, Journée sur la Conservation-Restauration des Biens Culturels : traitement des supports, Paris, 101-109.
- <sup>2</sup> Tidblad, J., Kucera, V., Henriksen, A.A., Kreislova, K., Yates, T., 2001: UN ECE ICP Materials: dose-response functions on dry and wet acid deposition effects over 8 years of exposure, *Water, Air, Soil Pollution*, 130, 1457-1462.
- <sup>3</sup> Tidblad, J., Kucera, V., 2007: Dose-response functions and tolerable levels for corrosion in the multi-pollutant situation, *Pollution Atmosphérique*, n° spécial « Effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux », 87-93.
- <sup>4</sup> Tidblad, J., 2010: Dose-Response and Damage Functions for Materials in a Changing Climate, *Proceedings of the 2009 Ravello International Workshop and Strasbourg European Master-Doctorate Course*, R.-A. Lefèvre & C. Sabbioni, Ed., Edipuglia, Publ., Bari, 71-79.
- <sup>5</sup> Brimblecombe, P., Lefèvre, R.-A., 2021: Weathering of materials at Notre-Dame from changes in air pollution and climate in Paris, 1325-2090, *Journal of Cultural Heritage*, 50, 88-94.
- <sup>6</sup> Robert-Sainte, P., Gromaire, M.-C., de Gouvello, B., Saad, M., Chebbo, G., 2009: Annual metallic flows in roof runoff from different materials: test-bed scale in Paris conurbation. *Environ Sci Technol* 43 (15):5612-5618.
- <sup>7</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.

## La dégradation des murs par les remontées d'eaux chargées de sels et le changement climatique

Les eaux contenues dans les sols, chargées de sels dissous, montent à la base des murs poreux à la faveur des forces de capillarité qui les tirent vers le haut. L'ascension s'arrête quand le poids de l'eau compense les forces capillaires d'ascension. Tout au long du parcours ascensionnel, les sels dissous cristallisent successivement en fonction de leur solubilité et de l'évaporation de l'eau, elle-même gouvernée par la température et l'humidité relative de l'air ambiant <sup>1, 2</sup>.

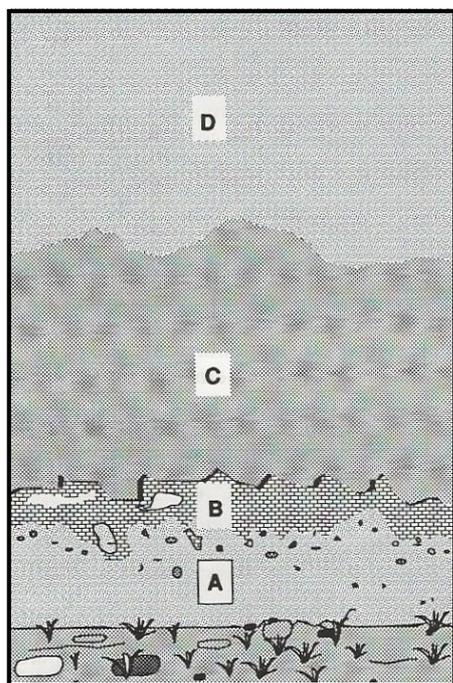


Fig. 1 - Zones de remontées capillaires dans un mur poreux <sup>1</sup>

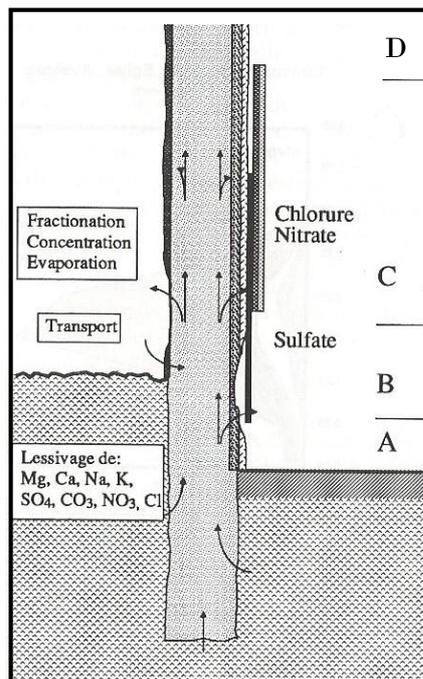


Fig. 2 - Synthèse des phénomènes dans la zone de remontée capillaire <sup>1</sup>

Les différentes zones de distribution de ces sels et des dégradations qu'ils produisent en cristallisant sont réparties de la façon suivante (Fig. 1 et 2) <sup>1</sup> :

- Zone A : peu de dégradations ; les carbonates de calcium (Calcite) et de magnésium (Magnésite) précipitent ;

- Zone B : importantes efflorescences de sulfates de magnésium (Epsomite, Kieserite, Hexahydrate), de sodium (Thénardite, Mirabilite) et de calcium (Gypse, Anhydrite), de nitrate de potassium (Nitrokalite), de carbonate de sodium (Natrite), causant les dégradations les plus importantes : désagréments sableux, alvéolisations, effritements, desquamations en plaques ;

- Zone C : cristallisation des nitrates et chlorures de calcium (Nitrocalcite et Antartcite), de magnésium (Nitromagnésite et Bischofite) et de sodium (Nitronatrite et Halite), qui sont hygroscopiques, d'où l'aspect sombre et humide avec peu ou pas de détériorations ni d'efflorescences ;

- Zone D : préservée.

Le comportement probable de ces sels et leurs dommages potentiels dans le passé et au 21<sup>ème</sup> siècle dans le cadre du changement climatique, peuvent se quantifier en calculant le nombre probable d'événements de dissolution-cristallisation (transitions de phase) par unité de temps, qui dépendent de la température et de l'humidité relative. Les sels qui ont été étudiés sont : la Halite, la Thénardite-Mirabilite, le Gypse-Anhydrite et un mélange de beaucoup plus de sels, qui reflète mieux la réalité sur les monuments que les sels isolés.

Une « climatologie des sels aux échelles européenne <sup>3,4,5</sup> et française <sup>6,7</sup> » reliant les cristallisations salines, le climat et les dégradations engendrées par ces phénomènes a été mise au point sur des sites d'Europe occidentale (dont Rouen, Caen et Paris) et pour l'ensemble du territoire français métropolitain. Les transitions de phases des sels ont été calculées en utilisant les températures et l'humidité relative quotidiennes obtenues à partir des observations météorologiques et les sorties des modèles climatiques dans deux scénarios des 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> Rapports du GIEC (A2 et RCP4.5). Les résultats montrent qu'il est possible d'associer les types de climats de Köppen-Geiger (voir le chapitre « *Quel futur climat pour le patrimoine en Europe ?* ») avec les dommages potentiels dus aux sels et ils suggèrent aussi des changements à venir dans ces types de climats ; par exemple, l'Europe occidentale, au climat très humide, pourrait changer pour un climat plus méditerranéen ou plus sec avec, en conséquence, une saisonnalité différente des transitions salines.

La « climatologie des sels à l'échelle de la France » <sup>7</sup> peut se représenter cartographiquement pour 41 stations de Météo-France uniformément réparties sur le territoire (Fig. 3). Elle se fonde sur des données climatiques passées recueillies par ces stations ou à venir projetées par le modèle Aladin-Climat, dans le scénario RCP4.5. Pour chaque localisation, la moyenne, le minimum, le maximum et la déviation standard de la température et de l'humidité relative quotidiennes ont été calculés sur 30 ans. Le nombre quotidien de transitions de phase évolue de la façon suivante du passé récent (1971-2000) au futur lointain (2071-2100) :

- Pour la *Halite* (Fig. 3a) le nombre de transitions restera stable dans 22 stations de Météo-France, augmentera dans 17 et baissera dans 2 ;

- Pour la *Thénardite-Mirabilite* (Fig. 3b) le nombre de transitions restera stable dans 26 stations, décroîtra légèrement dans 12 et augmentera dans 3.

- En ce qui concerne le *Gypse* (Fig. 3c), c'est le nombre de jours à humidité relative élevée qui est considéré car celle-ci permet à l'eau de pénétrer le système poreux et le Gypse d'y précipiter. Les variations seront plus importantes que pour la Halite et la Thénardite-Mirabilite. On observera une baisse dans la moitié NW de la France et une diminution dans la moitié SE. Au total : 18 stations demeureront stables, 23 baisseront et 1 seule augmentera.

- Pour le *mélange des sels précédents* (Fig. 3d), le risque baissera (dans 4 stations) ou sera constant (19 stations) sur les côtes du NW, du SW et de la Méditerranée, mais augmentera dans le centre du pays (19 stations).

- L'*augmentation de volume des sels* qui précipiteront a été représentée Fig. 3e. Elle concerne les sulfates de Na, Mg et Ca, les nitrates de Mg, Na, K, le chlorure de Na, un sel double de sulfate et nitrate de Na, et un autre de sulfate de Na et Mg. De façon générale le risque augmentera avec le temps : dans 14 stations il demeura constant et dans 24 il augmentera. Le SE de la France demeurera la zone la plus vulnérable.

En conclusion, on voit que le risque de dégradations dues à la cristallisation des sels dans les murs poreux en France, à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, sera constant ou à la hausse par rapport à la référence

de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle et qu'il sera plus élevé pour des mélanges de sels que pour des sels isolés, situation plus conforme à la réalité des murs. Cette étude s'est faite dans le cadre du scénario RCP4.5 qui est plutôt optimiste. Il ne fait pas de doute qu'avec le scénario RCP8.5, les prévisions auraient été beaucoup plus pessimistes.

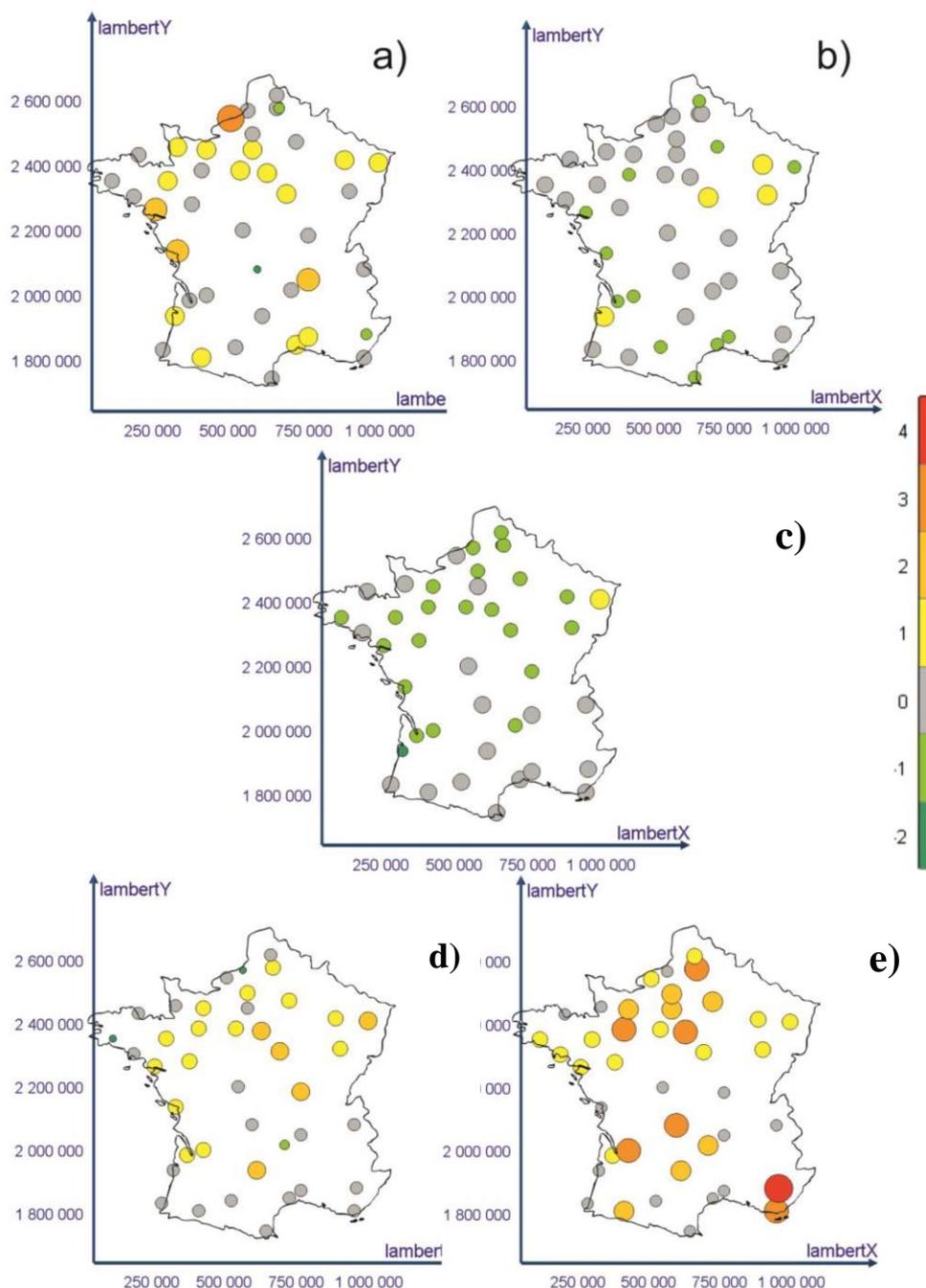
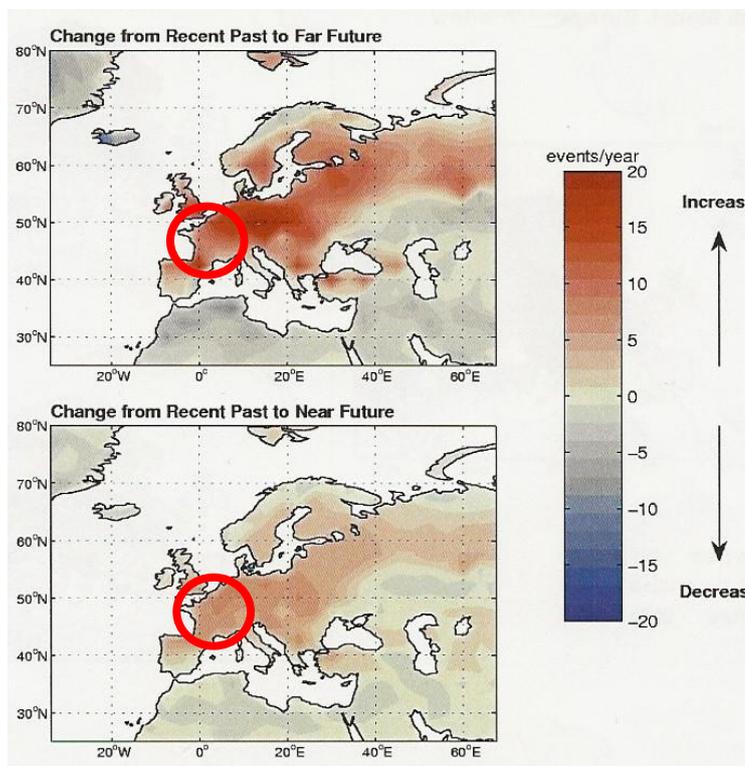


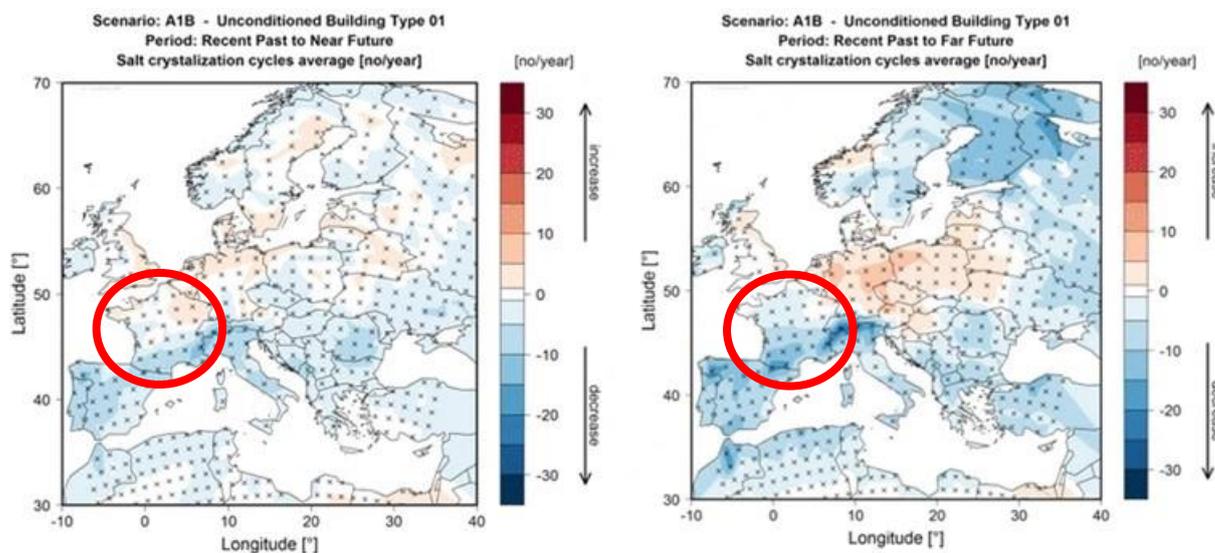
Fig. 3 - Variation du nombre par an de transitions de phase des sels entre le passé récent (1971-2000) et le futur lointain (2071-2100) en prenant en compte : (a) : NaCl ; (b) : Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; (c) : CaSO<sub>4</sub>; (d) : les 3 sels précédents, et (e) : le changement global de volume, selon le modèle Aladin-Climat de Météo-France, dans le scénario RCP4.5 du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC <sup>7</sup>.

L'évolution de la climatologie du patrimoine à l'échelle de l'Europe a été cartographiée dans les deux projets « Noah's Ark » <sup>9</sup> et « Climate for Culture » <sup>10</sup>. Nous reproduisons ci-dessous les

cartes concrétisant les changements projetés entre la période actuelle et la fin du 21<sup>ème</sup> siècle pour la cristallisation des sels telles qu'elles ont été produites dans chacun de ces deux projets (*Fig. 4 et 5*).



*Fig. 4 – Changements en Europe et en France dans la cristallisation des sels (nombre d'évènements/an) entre, en bas, le passé récent (1961-1990) et le futur proche (2010-2039), et, en haut, le passé récent et le futur lointain (2070-2099), selon le modèle anglais HadRM3 dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC, cartographiés dans le projet Noah's Ark<sup>9</sup>*



*Fig. 5 – Changements en Europe et en France dans la cristallisation des sels (nombre d'évènements/an) dans un bâtiment non chauffé et non air-conditionné entre à gauche le passé récent (1961-1990) et le futur proche (2010-2039), et à droite le futur lointain (2070-2099), selon le modèle REMO dans le scénario A1B du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC, cartographiés dans le projet Climate for Culture<sup>10</sup>*

On peut extrapoler des cartes du premier projet (*Fig. 4*) que dans le futur proche il se produirait en France de 0 à +5 évènements/an de cristallisation par rapport au passé récent et de +5 à +10 évènements/an dans le futur lointain, avec le scénario A2 dans le modèle HadRM3.

En revanche, selon les cartes du second projet (*Fig. 5*), la situation serait stable dans le nord de la France dans les futurs proche (0 à +5 cycles / an) et lointain (0 à -5 cycles / an), mais verrait le nombre d'évènements décroître dans le sud de la France pour le futur proche (-5 à -10 cycles / an) et lointain (-10 à -15 cycles / an) selon le scénario A1B dans le modèle REMO.

Ces différences entre modèles et scénarios peuvent s'expliquer au premier abord par le fait que A2 projette une hausse des températures plus importante que A1B. Ces différences sont aussi liées à ce que le projet Noah's Ark considère l'*extérieur* des bâtiments culturels et le projet Climate for Culture l'*intérieur* des bâtiments non chauffés et sans air conditionné.

Il reste que ces études focalisées soit sur la France, soit sur l'Europe entière apportent des résultats plus précis que ceux qui concernent la totalité du globe <sup>11</sup>.

## Références

- <sup>1</sup> Arnold, A., 1995 : Evolution des sels solubles dans l'altération et la conservation des monuments, *in* La Pietra dei Monumenti nel suo Ambiente Fisico, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 195-214.
- <sup>2</sup> Vergès-Belmin, V., Bromblet, P., 2001: Altération de la pierre par les sels, *Monumental*, 226-233.
- <sup>3</sup> Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Menéndez, B., Benavente, D., Harris, I., 2008: Long Term Change in Salt Weathering of Stone Monuments in North-West France, *11<sup>th</sup> Int. Congress Deter. Conserv. Stone*, Torun, Poland, 121-128.
- <sup>4</sup> Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Menéndez, B., Benavente, D., Harris, I., Déqué, M., 2011: Climatology of salt transitions and implications for stone weathering, *Science of the Total Environment* 409, 2577-2585.
- <sup>5</sup> Benavente, D., Brimblecombe, P., Grossi, C.M., 2008: Salt weathering and climate change. *in* New Trends in Analytical, Environmental and Cultural Heritage Chemistry, Transworld Research Network, Colombini, London, 10, 277-286.
- <sup>6</sup> Benéndez, B., 2016: Salt Climatology applied to Built Cultural Heritage, *in* Cultural Heritage from Pollution to Climate Change, Edipuglia, Bari, 35-50.
- <sup>7</sup> Benéndez, B., 2019: Estimators of the Impact of Climate Change in Salt Weathering of Cultural Heritage, *in* *Preservation of Cultural Heritage and Resources Threatened by Climate Change*, Bertolin, C., éd., *Geosciences*, Special Issue Preservation Cultural Heritage Climate Change, 118-131.
- <sup>8</sup> Kotteck, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006: World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-253.
- <sup>9</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.
- <sup>10</sup> Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L. *et al.*, 2015: Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Herit Sci*, **3**, 38, doi:10.1186/s40494-015-0067-9
- <sup>11</sup> Climate Change and Cultural Heritage Working Group, 2019: The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action, ICOMOS, Paris, 62 p.

## Les monuments et sites français menacés par les crues et les étiages des fleuves

En dehors de l'invasion des zones continentales par les eaux marines, les inondations de bâtiments culturels peuvent être causées par le *débordement des cours d'eau*, la *remontée d'une nappe phréatique* ou le *ruissellement des eaux pluviales* dans les zones urbaines artificialisées (béton, bitume, pavés en pierre avec joints...) ne laissant pas l'eau s'infiltrer, surtout lors de pluies extrêmes qui débordent les dispositifs de collecte et de transport des eaux pluviales.

Pour ce qui concerne les *inondations par ruissellement pluvial urbain*, l'Agence Européenne de l'Environnement a publié une « *Carte des inondations urbaines en Europe* »<sup>1</sup> (Fig. 1) mettant en relation le pourcentage de sols imperméables et le nombre moyen annuel de jours avec des précipitations extrêmes (> 20 mm/jour). Le pourcentage de sols imperméabilisés par l'urbanisation est de 50 à 74% dans les grandes villes françaises, particulièrement à Paris (75 à 100%) : ils y sont propices aux inondations, en particulier lors des pluies extrêmes dont le nombre devrait s'accroître dans le nord du pays mais diminuer dans le sud, en moyenne annuelle.

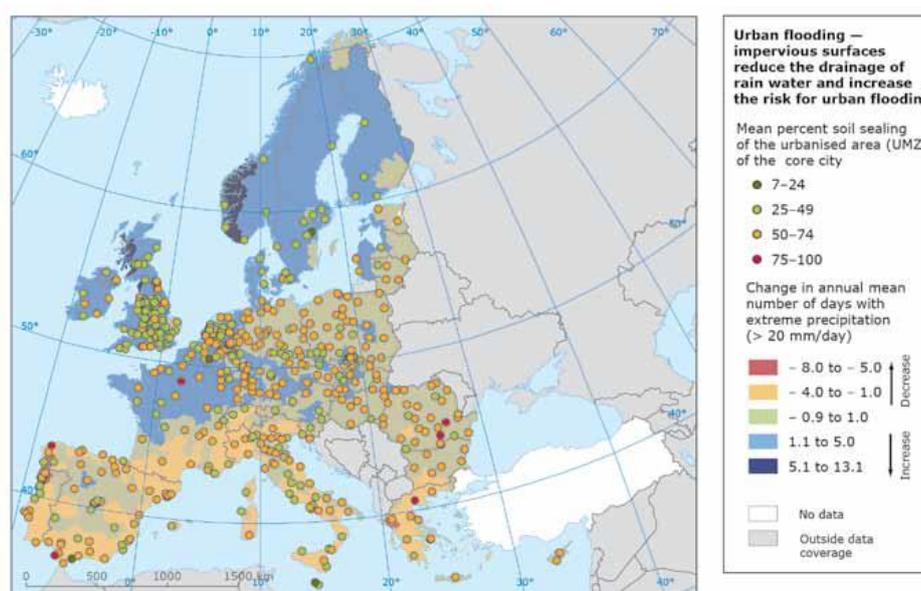


Fig. 1 – Inondations urbaines en Europe. Pourcentage des surfaces imperméabilisées et changements du nombre de jours par an avec des précipitations extrêmes<sup>1</sup>.

Selon la même Agence Européenne de l'Environnement<sup>2</sup> le changement climatique amènera des changements significatifs dans les *flux des rivières* en Europe avec une décroissance en été, même où les flux annuels devraient croître.

Les changements projetés du cycle hydrologique des rivières françaises au 21<sup>ème</sup> siècle a été étudié dans le contexte du changement climatique<sup>3,4</sup>. Il est projeté une diminution des débits dans les trois grands bassins de la Seine, de la Loire et de la Garonne, spécialement en été et en automne, mais une relative stabilité des débits du Rhône (Fig. 2).

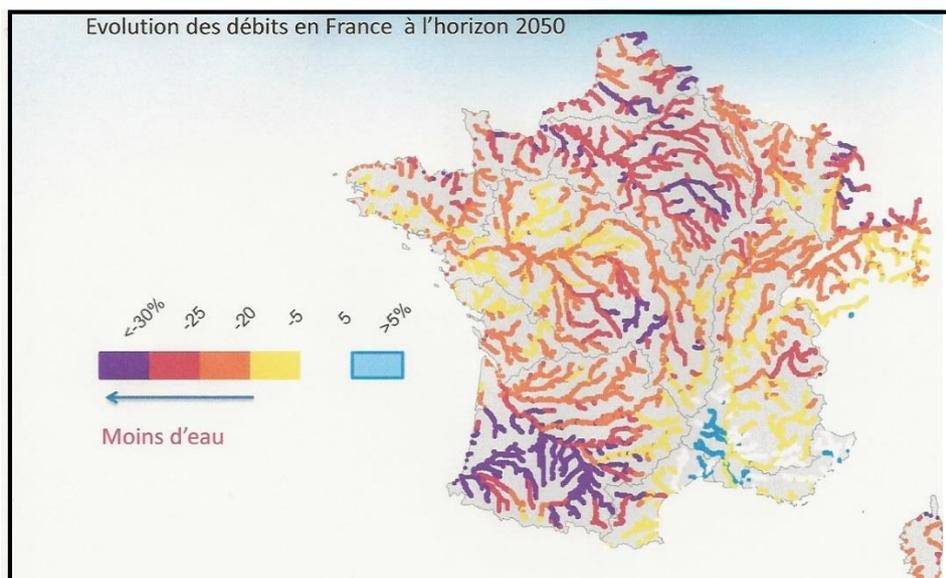


Fig. 2 – Evolution projetée des débits des rivières en France à l'horizon 2050 (F. Habets <sup>4</sup>)

Nous prendrons l'exemple de la capitale française où les berges de la Seine, véritable « Vallée des musées », sont particulièrement exposées au risque d'inondation.

La partie de Paris inscrite sur la Liste de l'UNESCO (les berges de la Seine entre le pont de Sully à l'Est et la Tour Eiffel à l'Ouest) est entièrement comprise dans la carte des débordements de la Seine lors de l'inondation de 1910 (Fig. 3 et 4). La menace est donc réelle et les conséquences sur les matériaux du patrimoine devraient être considérables.

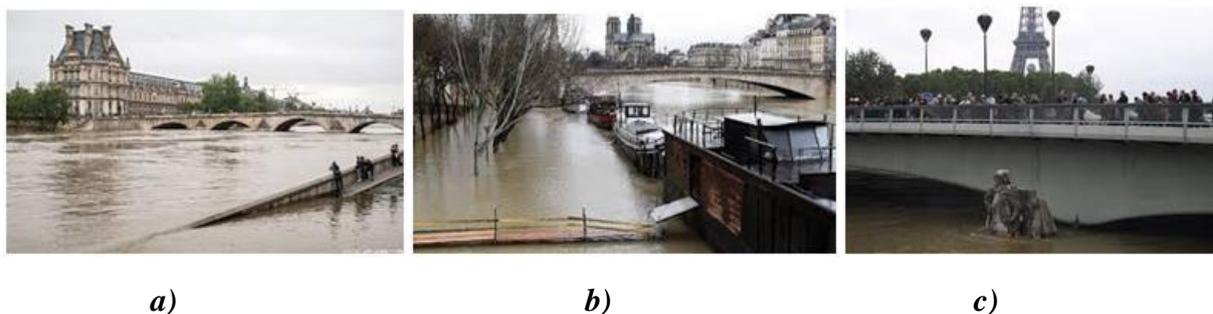


Fig. 3 - Quelques exemples du patrimoine culturel parisien menacé par la crue de la Seine en 1996 : a) Le Louvre et le Pont Royal ; b) Les quais rive gauche, le Pont de la Tournelle, Notre-Dame et l'Île Saint-Louis ; c) Le célèbre Zouave du Pont de l'Alma, échelle symbolique des crues à Paris, fait partie de l'image émotionnelle de la capitale.

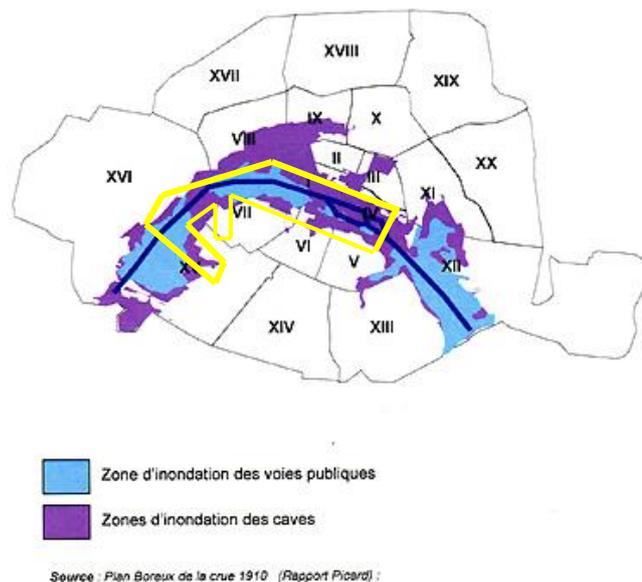


Fig. 4 - Carte de l'inondation de Paris en 1910 (Plan de Prévention des Risques d'Inondation, 2006). En jaune : extension approximative de la Liste de l'UNESCO à Paris.

Les crues de la Seine et leur survenue dans le futur sont étroitement liées, entre autres, au régime des précipitations sur son bassin versant. Ce régime dépendra lui-même de l'évolution future du climat dans le nord de la France.

Une baisse des nappes phréatiques et des débits d'ici à la fin du siècle est projetée dans le bassin de la Seine entraînant un assèchement prononcé<sup>5</sup> : la baisse des débits se répercuterait davantage sur les basses eaux que sur les hautes eaux ; les crues extrêmes ne changeraient pas significativement ; enfin, la crue centennale resterait du même ordre de grandeur qu'actuellement.

M. Reghezza-Zit fait quelques références au patrimoine culturel dans son ouvrage « *Paris coule-t-il ?* »<sup>6</sup>.

« ...Les circulations d'eau dans les sous-sols sont extrêmement dangereuses...car elles déchaussent les fondations des bâtiments....

...De multiples exemples donnent une idée de l'ampleur de l'inondation dans les sous-sols. Les bâtiments à vocation culturelle sont particulièrement nombreux à se trouver dans ce cas. Le Muséum national d'histoire naturelle... renferme une extraordinaire collection de plusieurs centaines de milliers de spécimens d'animaux et d'insectes. Cette zoothèque occupe trois niveaux souterrains à quelques centaines de mètres du fleuve...

... De son côté, le Louvre abrite en sous-sol – outre des espaces d'accueil, un auditorium et l'ensemble des équipements techniques (électricité, chauffage, climatisation, Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France...) – ses collections d'art islamique et égyptien, des sculptures antiques et le Louvre médiéval....

...L'École des beaux-arts a elle aussi de gros soucis en perspective. En 1910, l'eau atteignait environ 1,20 mètre dans la cour Bonaparte et la chapelle des Petits-Augustins ... Dans ces bâtiments, classés monuments historiques, l'École conserve de nombreuses collections inestimables...

*...Les pertes intangibles sont de nature variée. Par exemple, si la capitale subit une inondation, son image sera entachée pendant plusieurs mois. Les touristes risquent de s'en détourner. La perte d'image est un coût intangible qui va déboucher sur des coûts tangibles pour les hôteliers, les restaurateurs, les voyageurs, etc... ».*

Nous ajouterons, pour donner un exemple concret des risques, que le musée du Louvre délocalise ses réserves à Liévin, celles-ci étant inondables, et que le musée du Quai Branly a été récemment construit sur pilotis en bord de Seine (Fig. 5). En revanche, dans le rapport de la mission « *Ile de la Cité, le Cœur du Cœur* »<sup>7</sup>, qui présente un projet de reconfiguration urbanistique complète de cette île située au cœur de Paris, le risque d'inondation des importantes infrastructures qu'elle prévoit en sub-surface, en particulier de la crypte archéologique du parvis de Notre-Dame, n'est pas évoqué. Ne sont pas mentionnées non plus les conséquences qu'auraient les étiages de la Seine pour les débarcadères de touristes et les plateformes flottantes avec piscines qu'il est prévu d'installer sur le petit bras du fleuve, sur le flanc sud de l'île. Cet oubli des impacts climatiques potentiels liés au fleuve est d'autant plus étonnant que les auteurs sont sensibles à l'impact climatique qu'auraient le chauffage et la climatisation des bâtiments anciens devant la quasi-impossibilité de les isoler efficacement par l'extérieur ou l'intérieur. Ils prévoient ainsi le développement d'un « réseau énergétique intelligent » pour remplacer les actuelles installations très vétustes et énergivores, et la couverture des nombreuses cours intérieures des édifices par des verrières qui réduiraient de 40% les surfaces des bâtiments exposées à l'air extérieur.

Ainsi sont cités, à propos des crues de la Seine, quelques aspects spécifiques du patrimoine culturel parisien : les fondations des bâtiments, les collections, les musées, les écoles d'art, les sites archéologiques et les retombées économiques du tourisme. Une inondation de Paris par la Seine aurait des conséquences considérables pour son patrimoine culturel, surtout en sous-sol : mouillage et salissure des œuvres, des collections, des archives et des réserves des musées, obligeant à d'importants travaux de séchage et de restauration. En surface, il y aurait fragilisation des berges, des quais, des ponts et des fondations anciennes causant une instabilité structurale. Des débris flottants pourraient causer des dommages aux édifices et détruire les petits objets du patrimoine. Au retrait des eaux, des auréoles sombres trahiraient l'humidité résiduelle des murs et d'inesthétiques auréoles de remontées capillaires d'eaux chargées de sels apparaîtraient.

Les *ponts historiques* de Paris, aux arches et piles nombreuses et resserrées, inscrits eux-aussi au patrimoine mondial de l'UNESCO, pourraient devenir des dangers car ils ralentiraient l'écoulement des eaux des crues de la Seine, comme ce fut le cas pour le Ponte Vecchio sur l'Arno lors des inondations catastrophiques à Florence en novembre 1966<sup>8</sup>.

Les *étiages de la Seine*, comme en 2017, peuvent-ils avoir un impact sur le patrimoine culturel parisien ? La réponse est délicate : il est sûr que les fondations des édifices établis sur la nappe alluviale de la Seine pourraient souffrir d'une restriction d'eau dans les sous-sols qui ferait se contracter les terrains asséchés. L'absence de terrains argileux dans le sous-sol parisien superficiel limiterait en revanche les risques liés à la rétraction des argiles gonflantes. Cependant, la restriction de l'eau dans l'avenir, comme le suggèrent les modèles climatiques<sup>5</sup>, pourrait avoir des conséquences néfastes sur la végétation des parcs, jardins et perspectives arborées de la capitale, sur les façades et toits végétalisés, mettant en péril toute la politique de la « nature en ville » de la Municipalité, et sur les possibilités d'arrosage pour rafraîchir l'atmosphère urbaine en période de canicule. Ainsi, et paradoxalement à première vue, la réalisation d'un 5<sup>ème</sup> lac de retenue des eaux de la Seine devient

urgente, non pas tant pour réguler les crues que pour servir de réservoir pour compenser les futurs étiages.

En 2016, *la crue du Cosson*, qui a été détournée pour former un canal et alimenter les douves du *château de Chambord*, a atteint celui-ci, comme le montrent les images en couverture de cette brochure. Le directeur du château estime alors accuser « *une perte d'exploitation de 150 000 à 200 000 euros à cause des cinq jours de fermeture forcée dus aux inondations... De nombreux dégâts sont à déplorer, notamment l'écroulement de 125 mètres de murs d'enceinte, les portes métalliques du domaine ont été arrachées, une digue d'étang a été emportée sur une largeur de dix mètres, le système électrique de la boutique est hors d'usage, le dispositif anti-incendie partiellement atteint, l'état des voiries et allées forestières aux abords du château est alarmant... et le coût des réparations est estimé entre 500 000 et 1 million d'euros*<sup>9</sup> ».

Comme partout dans le monde, la plupart des villes historiques françaises ont été bâties sur des rivières ou des fleuves, ce qui les rend vulnérables aux inondations et aux étiages. Les exemples de Paris et de Chambord, que nous avons développés, montrent que les risques liés au changement climatique doivent être pris en considération rapidement comme cela a été le cas lors de la conception du Musée du Quai Branly, construit sur pilotis en bord de Seine et inauguré en 2006 (Fig. 5).



Fig. 5 - Le musée des Arts premiers du Quai Branly, en bordure de Seine, a été construit par Jean Nouvel sur des pilotis pour éviter les dommages dus aux inondations du fleuve (a). De plus, sa façade a été végétalisée, contribution à l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain (b).

**Devant les risques d'inondations par ruissellement pluvial urbain ou de crues et d'étiage dans les zones où le patrimoine culturel est exposé, il faut impérativement :**

- *Inventorier et cartographier* les bâtiments culturels menacés par les inondations ;
- Produire des *plans d'urgence* dans le cas d'inondation ;
- Identifier les *sites refuges* capables d'abriter les biens culturels en cas d'inondation ;
- Surveiller spécialement les *ponts historiques* qui deviennent un danger en cas de crue en freinant l'écoulement des eaux et en bloquant les objets flottants ;
- Prévenir une partie des inondations par la *perméabilisation des chaussées* et l'extension des *parcs et jardins urbains* ;
- Installer des *valves anti-retour* sur les conduits d'évacuation des eaux dans les sous-sols ;
- Prévoir des sites de *séchage* et de *restauration* des œuvres et objets immergés lors d'une crue ;
- Proscrire les *nouvelles constructions culturelles* non adaptées dans les zones à risque d'inondation ;
- *Cartographier* les zones au risque de *remontée des nappes phréatiques* ;
- Prévoir les conséquences du *manque d'eau* dans les périodes d'*étiage* (stockage des eaux dans les lacs de retenue en amont).

## Références

- <sup>1</sup> European Environment Agency, 2012: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012, an indicator-based report, Report n° 12/2012
- <sup>2</sup> European Environment Agency, 2017 : Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 , An indicator-based report, EEA Report No 1/2017
- <sup>3</sup> Boe', J., Terray, L., Martin, E., Habets, F., 2009: Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century, *Water Resour. Res.*, 45, W08426, doi:10.1029/2008WR007437.
- <sup>4</sup> ONEMA, 2015 : Séminaire de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, 5 février, Paris, in Les Rencontres de l'ONEMA n° 30 <http://seminaireeauclimat2015.onema.fr/pdf/RencontresOnema30FR.PDF>
- <sup>5</sup> Ducharne, A., Habets, F., Oudin, L., Gascoin, S., Sauquet, E., Viennot, P., Hachour, A., Déqué, M., Martin, E., Page, C., Terray, L., Thierry, D. : 2010 : Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. *SHF "Risques inondation en Ile de France"*, Paris, 8 p.
- <sup>6</sup> Reghezza-Zit, M., 2011 : Paris coule-t-il ? Fayard, Paris, 200 p.
- <sup>7</sup> Bélaval, P., Perrault, D., 2016: Mission Ile de la Cité, Le Coeur du Coeur, Rapport, Centre des Monuments Nationaux & Dominique Perrault Architectes, Paris, 56 p.
- <sup>8</sup> Arrighi, C., Castelli, F., Brugioni, M., Franceschini, S., Mazzanti, B., 2016: Flood risk and cultural heritage: the case study of Florence ( Italy), *European Geosciences Union, General Assembly 2885*, abstract.
- <sup>9</sup> Azimi, R., 2016 : Les musées font le bilan après les inondations, *Le Monde.fr*, 8 juin .

## Les monuments et sites archéologiques français menacés par la montée des eaux marines

Les impacts de la montée des eaux marines sur le littoral en relation avec le changement climatique ont fait l'objet de beaucoup d'études récentes <sup>1</sup>.

Comme nous l'avons écrit en introduction, on peut estimer que *136 biens du Patrimoine mondial* sur les 1121 recensés en 2019 seraient concernés par des crues conséquentes dues à l'élévation du niveau des mers, dont Arles (altitude : 0 à 57m, *Fig. 1*), le Mont Saint Michel (érosion de la base des remparts, *Fig. 2*), Le Havre (0 à 105 m, *Fig. 3*) et le Port de la Lune à Bordeaux (1m, *Fig. 4*) <sup>2</sup>.



*Fig. 1 – Arles, au bord du Rhône, face à la plaine humide de la Camargue qui la sépare de la Méditerranée. Inscrite sur la liste de l'Unesco en 1981, la ville conserve des monuments romains et un monument majeur de l'art roman : la cathédrale Saint-Trophime et son cloître.*



*Fig. 2 – Le Port de la Lune à Bordeaux au ras des eaux de la Gironde. Inscrit en 2007 sur la liste de l'UNESCO, il s'agit d'un ensemble architectural exceptionnel créé à l'époque des Lumières.*



*Fig. 3 – Le Mont Saint-Michel, menacé par l'érosion de la base de ses remparts. L'abbaye bénédictine de style gothique et le village, inscrits sur la liste de l'UNESCO en 1979, sont construits sur un îlot rocheux au milieu de grèves immenses soumises au va-et-vient de puissantes marées.*



*Fig. 4 - Le Havre, au bord de la Seine et de la Manche, reconstruit par Auguste Perret après la seconde guerre mondiale. Inscrit sur la liste de l'UNESCO en 2005, il est un exemple remarquable de l'architecture et de l'urbanisme de l'après-guerre avec un recours au béton préfabriqué. © Erik Levilly / Ville du Havre.*

Dans l'ensemble du *pourtour méditerranéen*, 49 sites de la Liste de l'UNESCO, dont Arles (Fig. 1), sont situés en zone côtière basse : 37 sont menacés de submersion et 42 d'érosion marine d'ici 2100, selon une étude récente<sup>3</sup> des risques de 2000 à 2100, dans 4 scénarios de hausse du niveau marin (RCP 2.6, 4.5, 8.5 et un « très haut » représentant le 95<sup>ème</sup> percentile de RCP 8.5). Un indice de *risque de submersion*, combinant la hauteur et la fréquence des ondes de tempête avec la surface immergée et la profondeur de l'inondation, va de 0 (pas de risque) à 10 (très haut risque, quand au moins 50% du site sont submergés avec une profondeur d'au moins 1m). Un indice de *risque d'érosion*, combinant la montée du niveau marin avec la distance à la côte et la sensibilité du site à l'érosion (mais pas les caractéristiques internes du site), va encore de 0 à 10. Selon le scénario le plus haut, pour l'indice de submersion Arles, seul site français concerné par l'étude, ira de 0 en 2000 à 4 en 2100, et pour l'indice d'érosion de 0 à 4-7. A titre de comparaison, Venise et sa lagune, qui avaient déjà en 2000 un indice de submersion >9 et un indice d'érosion de 7-9, iront en 2100 jusqu'à 9-10 pour les deux indices selon le même scénario très haut.

L'étude « *EuroSION* » de la Commission Européenne<sup>4</sup> - qui a fait une mention spéciale de la Côte d'Albâtre en Haute-Normandie (« *Les falaises blanches de Haute-Normandie...sont célèbres dans le monde entier par la beauté saisissante d'Etretat, au sud de la côte...La région tire une partie substantielle de ses revenus du tourisme*») - recommande des recherches sur les impacts du changement climatique sur le trait de côte et sur le phénomène de l'intrusion d'eau saline.

En plus de l'érosion des côtes, la *submersion* du littoral peut se faire par la simple *montée des eaux*, le *franchissement* des structures de protection par les vagues de tempête et la *rupture* de ces structures. La fréquence de très hauts niveaux marins augmente fortement avec la montée graduelle du niveau des océans : des phénomènes centennaux du passé pourraient devenir annuels à l'horizon 2050 dans bien des régions, avec les risques de submersion et d'érosion du littoral qu'ils impliquent. Il en résulte, en plus des destructions d'édifices culturels ou de sites archéologiques, une invasion des zones continentales par des eaux chargées de sels nocifs pour les matériaux du patrimoine.

*L'érosion des plages sableuses* est devenu un problème majeur avec la montée du niveau des océans. Les plages couvrent 40% des côtes dans le monde, mais la moitié d'entre elles pourraient disparaître à la fin de ce siècle. Cependant, des actions pourraient prévenir 40% de cette érosion car elles sont résilientes aux variations climatiques et peuvent s'accommoder des hautes eaux et des tempêtes par retraitement et adaptation de leur morphologie<sup>5</sup>. Elles renferment souvent des sites archéologiques et voisinent avec des édifices qui pourraient être menacés par leur érosion.

Un quart du littoral français métropolitain recule du fait de *l'érosion marine*, soit 1720 km de côtes. Le *recul du trait de côte* n'est cependant pas un phénomène généralisé à l'ensemble du littoral français<sup>6,7</sup>. La *submersion* marine touche, quant à elle, une part importante de ce littoral : ce n'est pas moins d'un million d'habitants qui pourraient être *inondés* chaque année en 2050, essentiellement en Loire-Atlantique, Vendée, Charente-Maritime, Gironde, Seine-Maritime et Pas-de-Calais<sup>8</sup>. Le BRGM a mené plusieurs études sur l'érosion et la submersion du littoral français métropolitain, en particulier la zone côtière Languedoc-Roussillon (Projet Miseeva)<sup>9</sup> et le littoral breton (Atlas des aléas littoraux)<sup>10</sup>. Toutes ces régions sont riches en *patrimoine culturel bâti* et en *sites archéologiques*.

L'évaluation de la vulnérabilité du *patrimoine archéologique littoral* est difficile car les sites sont de divers types et subissent des contraintes variées : apports de sédiments, action des vagues, direction du vent, nature des vestiges, impact local du comportement humain passé et présent<sup>11</sup>.

Depuis 2006, le projet ALERT (Archéologie, Littoral et Réchauffement Terrestre)<sup>11, 12, 13</sup>, coordonné par le CREAAH (Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire) de l'Université de Rennes, a développé une méthodologie pour évaluer numériquement la vulnérabilité, la résilience et la gestion des sites archéologiques côtiers (Vulnerability Evaluation Form : VEF). Dix impacts, dont deux au moins sont en rapport avec l'érosion côtière, donc avec le changement climatique, entrent dans cette évaluation : la distance au bord de la falaise la plus proche et l'exposition du site aux vagues et au vent. La résistance (ou « résilience ») concerne celle des objets archéologiques et celle du substrat rocheux. La vulnérabilité est évaluée entre -2.8 (vulnérabilité la plus basse) et 5.2 (vulnérabilité la plus haute) en croisant les impacts et la résistance.

Cette méthodologie a été appliquée à la Basse-Normandie, la Bretagne (*Fig. 5*) et les Pays de la Loire, ainsi qu'en Galice. Une application mobile a été créée pour le recueil des données. Le système a été testé à la suite des fortes tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur l'île de Roc'h Santec où les changements et les dommages ont été évalués, en partie par des reconstructions en 3D.

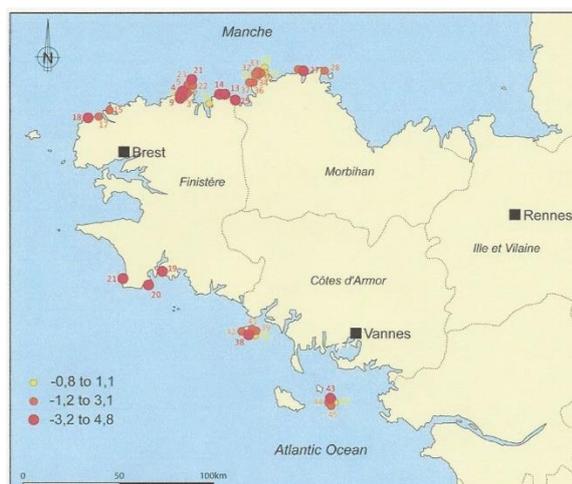


Fig. 5 - Carte simplifiée de la vulnérabilité des sites archéologiques de Bretagne en 2014 <sup>13</sup>.

### Mesures d'adaptation du patrimoine culturel face à la montée du niveau marin :

- *Inventorier* les bâtiments, les sites archéologiques et les paysages culturels menacés par l'érosion côtière et l'invasion marine ;
- Introduire le patrimoine culturel dans les *plans de protection du littoral* et de développement durable ;
  - Adapter les territoires et les projets architecturaux aux *zones littorales* exposées aux risques d'inondations ou instables ;
- Créer des *systèmes d'alerte* et des *plans d'action* en cas de crise ;
- *Proscrire les nouvelles constructions culturelles* non adaptées dans les zones littorales inondables ou instables ;
- Renforcer les *structures protectrices* et *imperméables* ;
- Planifier le *repli stratégique* du patrimoine bâti le plus vulnérable ou le plus remarquable.

### Références

- <sup>1</sup> Cazenave, A., Le Cozannet, G., 2013: Sea level rise and its coastal impacts, *Earth's Future*, 2, 15–34, doi:10.1002/2013EF000188
- <sup>2</sup> Marzeion, B., Leversmann, A., 2014: Loss of cultural world heritage and currently inhabited places to sea-level rise, *Env. Res. Letters*, 9, 3, 7 pp.
- <sup>3</sup> Reimann, L., Vafeidis, A. T., S., Hinkel, J., Tol. R.S., 2018: Mediterranean UNESCO World Heritage at risk from coastal flooding and erosion due to sea-level rise. *Nature Communications* 9(1): 4161
- <sup>4</sup> EuroSION, 2004 : Vivre avec l'érosion côtière en Europe – Sédiments et Espace pour la Durabilité Luxembourg: Office pour les Publications Officielles des Communautés Européennes, 40 pp.
- <sup>5</sup> Voudoukas, M.I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L. et al. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nat. Clim. Chang.* **10**, 260–263 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>
- <sup>6</sup> Dantec, R., Roux, J.-Y., 2019 : Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : Urgence déclarée, *Rapport d'information au Sénat*, n° 511, 190 p.
- <sup>7</sup> Comité national de suivi du trait de côte, 2018 : <https://www.georisques.gouv.fr/breves/adaptation-du-littoral-au-changement-climatique>
- <sup>8</sup> Strauss, B.H., Kulp, S.A., 2019: Novel elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal

- flooding, *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>
- <sup>9</sup> Serrand, M., 2013 : Projet Miseeva : Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la zone côtière Languedoc-Roussillon face à la submersion marine, *Rapport final*, BRGM/RP, 60980 FR, 160 p., 32 fig., 5 tabl., 11 ann. <https://www.brgm.fr/projet/erosion-submersion-impact-changement-climatique-sur-aleas-risques-littoraux>
- <sup>10</sup> Schroëtter, J.M., Blaise, E. et al., 2015 : Atlas des aléas littoraux (érosion et submersion marine) des départements d'Ile et Vilaine, des Côtes d'Armor et du Finistère, Phase 1, *Rapport final*, BRGM/RP, 65212 FR, 137 p., ill., 19 ann.
- <sup>11</sup> Daire, M.-Y., Lopez-Romero, E., Proust, J.-N., Regnauld, H., Pian, S., Shi, B., 2012: Coastal Changes and Cultural Heritage (1): Assessment of the Vulnerability of the Coastal Heritage in Western France, *Journal of Island & Coastal Archaeology*, 7:168–182.
- <sup>12</sup> Daire, M.-Y., Olmos, P., López-Romero, E., 2015 : Le projet ALeRT : des sites archéologiques en danger sur le littoral de la Manche et de l'Atlantique, *Archéopages*, 42, <http://journals.openedition.org/archeopages/1321> ; DOI : [10.4000/archeopages.1321](https://doi.org/10.4000/archeopages.1321)
- <sup>13</sup> Olmos Benlloch, P., López-Romero, E., Daire, M.-Y., 2017: Coastal erosion and public archaeology in Brittany, France: recent experiences from the ALeRT project, in Dawson, T., Nimura, C., Lopez-Romero, E., Daire, M.-Y., *Public Archaeology and Climate Change*, Oxbow Books, 208 p.
-

## **La contribution du patrimoine culturel à l'histoire passée et récente du climat en France : documents écrits, relevés météorologiques anciens et dendroclimatologie**

Le patrimoine culturel matériel peut apporter une contribution originale à la reconstruction du passé climatique de la France en exploitant trois sources documentaires appartenant à ce patrimoine : des documents écrits, des relevés météorologiques anciens et des enregistrements contenus dans les cernes des arbres utilisés dans les monuments historiques.

En l'absence de relevés instrumentaux directs des paramètres climatiques passés (températures, précipitations, humidité relative...), une reconstruction indirecte peut être faite au moyen de *proxies*. « Littéralement, un proxy est une autorité qui représente ou agit pour une autre. En climatologie, les données proxy sont des observations basées sur certains phénomènes physiques qui peuvent représenter des variables atmosphériques, par exemple l'épaisseur des anneaux des arbres peuvent être représentatifs de la température de la période pré-instrumentale et l'arbre est alors utilisé comme un proxy à la place d'un thermomètre » <sup>1</sup>

Le climat passé et récent de la France a fait l'objet ces dernières décennies de nombreuses recherches historiques menées à partir de *documents écrits*, eux-mêmes parties prenantes du patrimoine culturel, conservés dans les archives et les bibliothèques. Les études les plus connues sont celles d'Emmanuel Le Roy Ladurie <sup>2</sup> et de son école <sup>3</sup>. Cependant, les résultats de ces recherches sont le plus souvent *descriptifs et qualitatifs* (au moins jusqu'à l'apparition des relevés météorologiques au 17<sup>ème</sup> siècle), et ne concernent avant tout que des *événements extrêmes* (grandes chaleurs et grands froids, précipitations intenses, inondations, sécheresses, tempêtes...), les données quantitatives ou numériques se limitant à des dates et à des durées d'évènements géographiques lents (recul des glaciers...) ou socio-économiques (vendanges, récoltes, disettes...) <sup>4,5</sup>.

A l'inverse, il existe des *données quantitatives anciennes* : ce sont soit des *relevés de températures et d'humidité*, soit des mesures combinées d'âge et de températures obtenues sur les cernes des arbres utilisés pour la construction des édifices culturels : il s'agit de la *dendrochronologie* et de la *dendroclimatologie* établies sur les bois des charpentes. Ces bois ont l'avantage d'être engagés dans des constructions culturelles d'âge généralement assez bien connu, ce qui permet de comparer cette donnée historique avec les résultats de la dendrochronologie.

Ces deux types de résultats pour le passé (relevés météorologiques et dendroclimatologie) sont extrêmement utiles, voire indispensables, pour vérifier la robustesse des actuels modèles quantitatifs prédictifs, dans le contexte du dérèglement climatique.

A Paris, par exemple, les premiers *relevés de températures* ont été effectués, de 1658 à 1660, par Ismaël Boulliau <sup>6</sup>. Les températures mensuelles dans la capitale sont ainsi connues depuis 1658 <sup>7</sup> ; pour la région parisienne, elles existent depuis 1676 <sup>8</sup>.

Les principes de la *dendroclimatologie* ont été résumés récemment par Valérie Daux <sup>9</sup> : « *Les arbres présentent des atouts certains en paléoclimatologie : 1) ils sont répandus sur une grande partie des surfaces continentales ; 2) dans les régions à climat méditerranéen, tempéré, subarctique, ou montagneux, les arbres fabriquent des cernes annuels constitués de matière organique contenant essentiellement du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène; 3) en combinant les bois d'arbres vivants, de poutres de bâtiments historiques, voire d'arbres subfossiles, il est possible de réaliser des chronologies de plusieurs centaines d'années, datées avec précision ; 4) l'analyse isotopique de quelques individus suffit pour obtenir un signal à valeur régionale, 5) et, enfin, les variations de la composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ), et du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de la cellulose des cernes sont en général fortement corrélées à celles de paramètres climatiques... Les arbres ne sont néanmoins pas des archives climatiques parfaites... ».*

Nous rapporterons ci-dessous, à titre d'exemples français, les résultats des études effectuées sur **des poutres de bâtiments historiques** à *Fontainebleau* et à *Angoulême*, et ceux qui sont attendus en *région parisienne*.

A *Fontainebleau*, une première chronologie de  $\delta^{18}\text{O}$ , de 1596 à 2000, a été établie à partir de bois de chênes vivants de la forêt et de **poutres en chêne du château** (Salle de bals, Clocher, Théâtre et Petites Ecuries) <sup>10, 11</sup>. Elle a été complétée à l'occasion de l'étude des sécheresses en France depuis 1326 <sup>12</sup>, à partir de forages de poutres en chêne de trois bâtiments du château correspondant à trois périodes de construction différentes : la Porte Dorée, la Chapelle et les Petites Ecuries dont le bois provient probablement de la forêt environnante. La *Fig. 1* donne une représentation des températures du Nord de la France déduites de la mesure du  $\delta^{18}\text{O}$  de la cellulose des chênes de Fontainebleau. Les températures maximales moyennées sur la période avril-septembre ( $T_{\text{max}}^{\text{AMJJAS}}$ ) sont celles qui sont les plus fortement corrélées avec les températures mesurées depuis 1880. Le Petit Age Glaciaire, du 14<sup>ème</sup> au début du 19<sup>ème</sup> siècles, interrompu par quelques décennies plus clémentes au 16<sup>ème</sup> et à la fin du 17<sup>ème</sup> siècles, est bien mis en évidence. Il en est de même pour le réchauffement actuel, inégalé par sa durée et son amplitude.

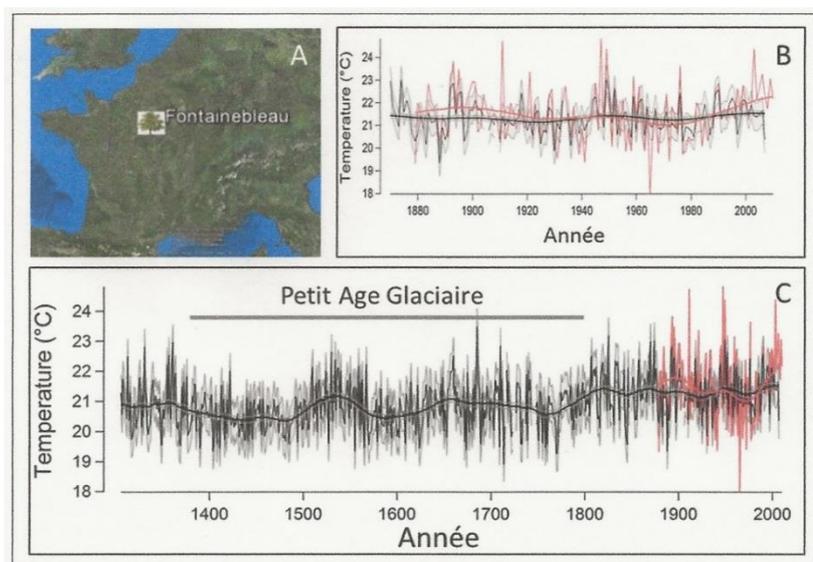


Fig. 1 - Reconstitution des températures dans la moitié Nord de la France à partir du  $\delta^{18}\text{O}$  des chênes de *Fontainebleau*, France (Etien et al., 2008 <sup>10</sup> ; Etien et al. <sup>11</sup>, 2009 et données non publiées). A) Localisation du

site d'étude. B) Comparaison des variations, au cours du temps, des températures maximales moyennées sur la période avril-septembre ( $T_{max}^{AMJJAS}$ ) calculées et mesurées. En rouge : température instrumentale ; en noir : température reconstruite à partir du  $\delta^{18}O$  de la cellulose des chênes de Fontainebleau. Les traits fins correspondent aux variations interannuelles, les traits épais à des moyennes glissantes sur 11 ans. La zone ombrée grise représente la zone d'incertitude calculée pour les températures reconstruites. C) Reconstitution des variations de température au cours des 7 derniers siècles. (Même légende pour les couleurs et les traits que dans la figure B.) (Extrait de Daux, 2013<sup>9</sup>).

Deux groupes de chênes de la Forêt de La Braconne, située à 15km à l'Est d'Angoulême, ont servi à l'établissement d'une première chronologie de  $\delta^{18}O$ , de 1860 à 2004<sup>13</sup>. Cette chronologie a été étendue jusqu'en 1326 en utilisant les arbres du plus vieux groupe précédent et des **poutres en chêne de bâtiments historiques** de la région d'Angoulême : la Maison du Comte d'Angoulême, l'Eglise de Poullignac (à 31km au Sud) et le Château de La Rochefoucauld (21km au Nord-Est), dans le cadre de la même étude qu'à Fontainebleau sur les sécheresses d'été en France depuis 1326<sup>12</sup> (Fig. 2). La provenance des poutres n'est pas documentée, mais est très probablement locale.

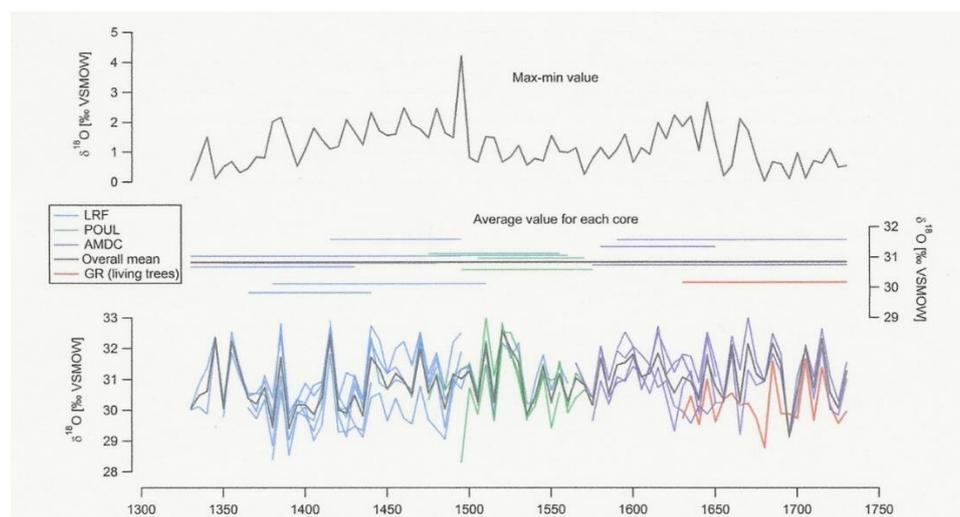


Fig. 2 – Chronologie de  $\delta^{18}O$  dans la région d'Angoulême. En bas :  $\delta^{18}O$  mesuré chaque 5<sup>ème</sup> année sur des carottages de poutres de différents édifices d'Angoulême (LRF : Château de La Rochefoucauld ; POUL : Eglise de Poullignac ; AMDC : Maison du Comte d'Angoulême). La ligne orange le  $\delta^{18}O$  de chênes vivants (GR). Au-dessus : étendues de temps et valeurs moyennes de  $\delta^{18}O$  pour chaque carottage ; la ligne grise épaisse représente le  $\delta^{18}O$  moyen de tous les carottages sur la période entière. En haut : Etendue des valeurs mesurées chaque année (valeur maximum moins valeur minimum) (Extrait de Labuhn et al., 2016<sup>12</sup>)

Les courbes obtenues à Fontainebleau (Fig. 1) et à Angoulême (Fig. 2) révèlent des tendances climatiques semblables dans les deux régions, ce qui suggère qu'elles ont une valeur représentative du climat de l'Ouest de la France sous influence océanique durant une longue période.

La charpente de Notre-Dame de Paris a été échantillonnée en 1991 en vue de son étude dendrochronologique<sup>14</sup>. L'incendie du toit de la cathédrale, le 19 avril 2019, a ouvert de façon inattendue un champ de recherches sur l'histoire récente du climat et de l'environnement en région parisienne par l'étude dendroclimatologique des restes non-calcinés de la charpente<sup>15</sup>. Les résultats de cette étude ont de grandes chances d'être semblables à ceux obtenus à Fontainebleau, car la probabilité qu'au moins une partie des chênes utilisés à Paris proviennent

de cette forêt n'est pas nulle : la forêt de Fontainebleau et Paris sont en bord de Seine, ce qui facilite le flottage du bois déjà suggéré par les historiens. Cette étude, dans le cadre du projet Casimodo<sup>16</sup>, devrait apporter des éclairages nouveaux sur le climat autour de l'an mil et sur l'optimum climatique médiéval, ainsi que sur le climat à Paris-même, en intégrant un possible effet d'Ilot de Chaleur Urbain qui resterait à évaluer. Ainsi, Notre-Dame pourrait-elle contribuer à la reconstruction du climat pour une période (l'an mil) durant laquelle elle n'existait pas encore (elle a été construite de 1163 à 1345). Ce serait un bel exemple de contribution du patrimoine culturel à l'histoire du climat

Les résultats des études dendroclimatologiques effectuées sur les chênes de la forêt et sur les poutres du château de Fontainebleau<sup>9, 10, 11, 12</sup> (Fig. 1) ont déjà permis de faire remonter de 1500 jusqu'à 1300 les données concernant les *températures et les précipitations* à Paris, dans une étude focalisée sur Notre-Dame<sup>17</sup> (Fig. 3).

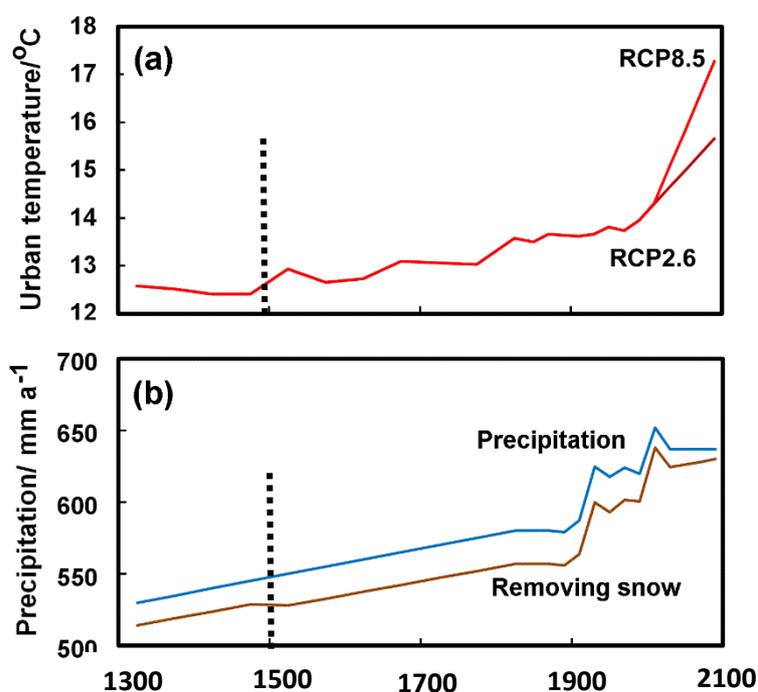


Fig. 3 – Evolution des températures et des précipitations à Paris de 1300 à 2100, en utilisant des données dendroclimatologiques et historiques, des relevés actuels et, pour le 21<sup>ème</sup> siècle, les modèles Aladin-Climat et GAINS dans les scénarios RCP2.6 et 8.5 du GIEC<sup>7</sup>.

En conclusion, les documents écrits et les relevés météorologiques sont des sources classiques de données sur le climat passé et récent de la France. De son côté, la *dendroclimatologie appliquée aux bois des édifices culturels* est une approche quantitative nouvelle et originale dans le domaine patrimonial, très prometteuse pour documenter ce climat ancien, les objets concernés étant très nombreux et généralement bien datés, ce qui devrait permettre un bon calage des résultats dans le temps et mettre en évidence d'éventuels remplois en l'absence d'autres signes sur les charpentes comme des embrèvements (entailles), tenons, mortaises, trous de cheville, marques d'assemblage. Ainsi, récemment, des campagnes sur les

cathédrales à *Beauvais* ou à *Bourges* ont permis de récolter des échantillons de bois <sup>18</sup>. Leur étude dendroclimatologique serait sans doute d'un grand intérêt. L'ensemble de ces résultats devrait contribuer à la vérification de la robustesse des modèles climatiques proposés pour le 21<sup>ème</sup> siècle.

## Références

- <sup>1</sup> Camuffo, D., 2019: Microclimate for Cultural Heritage, 3<sup>rd</sup> Edition, Elsevier, 584 p.
- <sup>2</sup> Le Roy Ladurie, E., 1967 : Histoire du climat depuis l'an mil, Paris, Flammarion, 1967, Nouvelle Bibliothèque scientifique, 379 p., 3<sup>ème</sup> réédition, 1983, 541 p.
- <sup>3</sup> Garnier, E., 2010 : Les Dérangements du temps, 500 ans de chaud et froid en Europe, Paris, Plon, 244 p.
- <sup>4</sup> Le Roy Ladurie, E., 2006 : Histoire humaine et comparée du climat. Disettes et révolutions 1740- 1860, Paris, Fayard, 611 p.
- <sup>5</sup> Garnier, E., 2012 : Sécheresses et canicules avant le Global Warming 1500-1950 , in Berchtold, J., Le Roy Ladurie, E., Canicules et froids extrêmes, Paris, Hermann, 297-325.
- <sup>6</sup> Camuffo, D., Della Valle, A., Becherini, F., Rousseau , D., 2020: The earliest temperature record in Paris, 1658–1660, by Ismaël Boulliau, and a comparison with the contemporary series of the Medici Network (1654–1670) in Florence, *Climatic Change*, <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02756-9>.
- <sup>7</sup> Rousseau, D., 2013 : Les moyennes mensuelles de températures à Paris de 1658 à 1675 – D'Ismaël Boulliau, à Louis Morin, *La Météorologie*, 81:11–22. <https://doi.org/10.4267/2042/51098>
- <sup>8</sup> Rousseau, D., 2009 : Les températures mensuelles en région parisienne de 1676 à 2008, *La Météorologie*, 67: 43–55.
- <sup>9</sup> Daux, V., 2013 : Reconstruction du climat à partir de la composition isotopique de l'oxygène et du carbone des cernes d'arbres, *La Météorologie*, 80, 14-22.
- <sup>10</sup> Etien, N., Daux, V., Masson-Delmotte, V., Stievenard, M., Bernard, V., Durost, S., Guillemain, M.T., Mestre, O., Pierre, M., 2008 : A bi-proxy reconstruction of Fontainebleau (France) growing season temperature from A.D. 1596 to 2000, *Clim. Past*, 4, 91-106.
- <sup>11</sup> Etien N., Daux, V., Guillemain, M.T., Masson-Delmotte, V., Stievenard, M., Breda, N., Boettger, T., Haupt, M., Mestre, O., Perraud, P.P., 2009 : Summer maximum temperature in northern France over the past century: Instrumental data versus multiple proxies (tree-ring isotopes, grape harvest dates and forest fires), *Clim. Change*, 94, 429-456.
- <sup>12</sup> Labuhn, I., Daux, V., Girardclos, O., Stievenard, M., Pierre, M., Masson-Delmotte, V., 2016: French summer droughts since 1326 CE: a reconstruction based on tree ring cellulose  $\delta^{18}\text{O}$ , *Clim. Past*, 12, 1101–1117.
- <sup>13</sup> Labuhn, I., Daux, V., Pierre, M., Stievenard, M., Girardclos, O., Féron, A., Genty, D., Masson-Delmotte, V., Mestre, O., 2014: Tree age, site and climate controls on tree ring cellulose  $\delta^{18}\text{O}$ : A case study on oak trees from south-western France, *Dendrochronologia*, 32, 78–89.
- <sup>14</sup> Chevrier V., 1995 : La charpente de la cathédrale Notre-Dame de Paris à travers la dendrochronologie, mémoire de DEA en histoire de l'art et archéologie médiévale, Université Paris IV, 1995, 2 vol.
- <sup>15</sup> Daux, V., 2020 :  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  de la cellulose des poutres de la cathédrale, *Chantier scientifique Notre-Dame : état des lieux et perspectives*, Colloque CNRS-Ministère de la Culture, Paris, 16-17 octobre, comm. orale.
- <sup>16</sup> Projet Casimodo, 2021-2024: Medieval climatic optimum and socioeconomic development : study of Notre-Dame de Paris wood frame and forestry consequences, CNRS-MCC-MNHN-ANR, coord. A. Dufraisse.
- <sup>17</sup> Brimblecombe, P., Lefèvre, R.-A., 2021: Weathering of materials at Notre-Dame from changes in air pollution and climate in Paris, 1325-2090, *Journal of Cultural Heritage*, 50, 88-94.
- <sup>18</sup> Lambert, G.-N., Hoffsummer, P., Bernard, V., Chevrier, V., 2019 : Note sur l'étude dendrochronologique de la charpente de Notre-Dame de Paris. ARCADE. Approche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Direction régionale des Affaires Culturelles de Provence-Alpes-Côte d'Azur, 201-204, <https://hal.archivesouvertes.fr/hal02144000>



## ***4<sup>ème</sup> Partie :***

### ***Les impacts du changement climatique***

#### ***sur le patrimoine monumental***

#### ***à aborder en France***

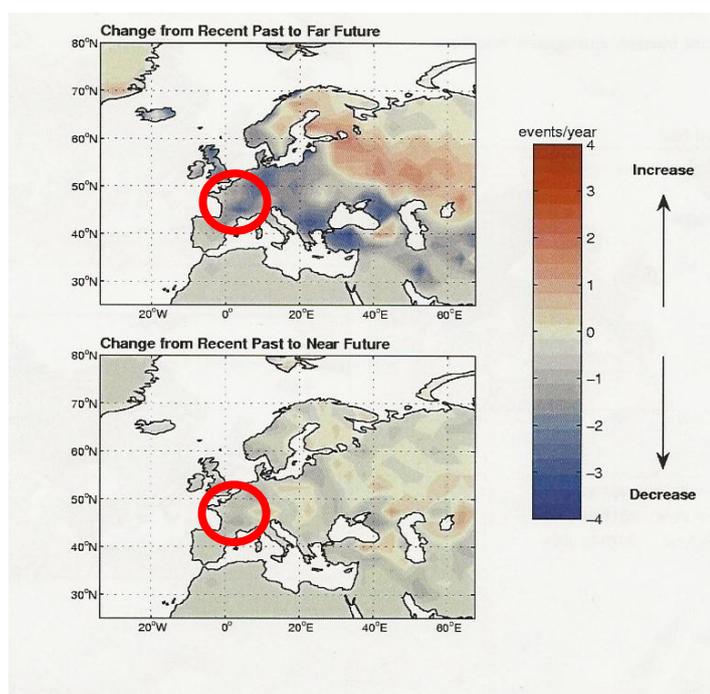
Les impacts potentiels du changement climatique décrits ci-dessous, qui ne sont pas encore abordés en France, mais qui mériteraient de l'être, sont soit des extrapolations pour la France de résultats d'études concernant le patrimoine culturel à l'échelle européenne (*les effets du gel-dégel, les environnements intérieurs*) ou des études ne concernant pas spécifiquement le patrimoine culturel mais dont les résultats peuvent être raisonnablement transposés à celui-ci (*la stabilité des édifices sur sols argileux*).



## Les effets du gel-dégel sur les matériaux du patrimoine culturel et le changement climatique

Le gel endommage les matériaux poreux lorsqu'ils sont humides : le volume de l'eau augmente dans les pores du matériau et le fait donc éclater. Ce changement de phase de l'eau se produit à une température précise (0°C) et les effets des changements de température liés au changement climatique, même faibles, peuvent avoir des effets amplifiés sur les matériaux.

Un *index de « gel humide »* a été développé dans le projet européen Noah's Ark <sup>1</sup> : il s'exprime par le nombre par an de jours de pluie à température positive, suivis immédiatement par des jours à la température moyenne inférieure à -1°C. Les résultats obtenus suggèrent que la plus grande partie de l'Europe tempérée, donc la France, verra une réduction du gel dans le futur (*Fig. 1*). Cela pourrait signifier que les pierres poreuses utilisées dans les monuments des régions tempérées, donc en France, seraient moins vulnérables au gel dans le futur <sup>1,2</sup> ; mais il y a un risque de gel tardif après des hivers plus humides. Seules quelques parties des Alpes, en haute altitude, devraient être affectées par un dégel du permafrost local, entraînant des glissements de terrains ou au moins des chutes de pierres enchâssées dans la glace qui fondra.



*Fig. 1 – Changements en Europe et en France dans le nombre par an de jours de pluie à température positive, suivis immédiatement par des jours à la température moyenne inférieure à -1°C (nombre d'évènements/an) entre le passé récent (1961-1990) et, en bas, le futur proche (2010-2039) et, en haut, le futur lointain (2070-2099), selon le modèle anglais HadRM3 dans le scénario A2 du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC, cartographiés dans le projet Noah's Ark <sup>1</sup>*

Le Projet européen Cultural HERitagE. Risks and Securing activities (CHEERS) (2018-2021) <sup>3</sup>, dont le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) est partenaire, s'intéresse à la sauvegarde du *patrimoine culturel alpin* face aux risques naturels : « *Le patrimoine culturel est au cœur de l'identité des territoires alpins et représente un enjeu économique fort pour ces derniers. Or, ces territoires, par leur situation géographique et topographique, sont soumis à de multiples aléas naturels dont les conséquences sur les biens*

*patrimoniaux peuvent s'avérer désastreuses... ».* L'étude de l'influence du changement climatique parmi les aléas évoqués n'apparaît pas clairement dans les premiers travaux menés dans le cadre de ce projet, mais sera certainement abordée dans la suite de ceux-ci, en particulier l'incidence du gel-dégel des matériaux, comme cela a été souligné dans le Rapport spécial du GIEC sur les océans et la cryosphère<sup>4</sup>.

## Références

- <sup>1</sup> Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M., 2010: The Atlas of climate change impact on European cultural heritage, London, Anthem Press, 160 p.
  - <sup>2</sup> Brimblecombe, P., 2006 : Heritage climatology, Edipuglia, Bari, p. 49-63
  - <sup>3</sup> CHEERS, 2018-2021 : Projet européen Cultural HERitagE. Risks and Securing activities Cultural HERitagE. Risks and Securing activities, <https://www.alpine-space.eu/projects/cheers/en/home>
  - <sup>4</sup> IPCC, 2019: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N., (eds.). In press.
-

## Le climat intérieur des musées, des bibliothèques, des collections, des archives et des réserves face à la pollution et au changement climatique

Les risques générés par une augmentation de la température ou une baisse de l'humidité relative dans les musées, bibliothèques, archives et réserves, et sur les objets et collections qu'ils abritent, sont généralement considérés comme négligeables (en dehors des événements extrêmes comme les inondations et les incendies). Cela est sans doute dû au manque de modèles de risque, lui-même dû à la relative nouveauté des sciences du patrimoine, au faible nombre de chercheurs et de moyens dont ils disposent, freinant l'évolution vers des « musées verts, archives vertes et bibliothèques vertes »<sup>1</sup>. En effet, les efforts se sont surtout concentrés sur les installations de chauffage et de climatisation afin de les adapter au climat actuel et réduire leurs effets péjoratifs. Mais peu est fait en termes de projections vers le climat futur.

Comme nous l'avons signalé précédemment, les bibliothèques et les archives sont les lieux de conservation des documents historiques qui permettent une reconstitution du climat passé et récent de la France, jusqu'à l'apparition des relevés météorologiques au 17<sup>ème</sup> siècle.

La notion de "*Climat historique*"<sup>2</sup> a été introduite pour prendre en compte les variations climatiques auxquelles les objets ont dû s'adapter dans les édifices au cours du temps. Le conflit entre d'une part les changements climatiques intérieurs, le confort thermique du public et du personnel, et d'autre part les besoins de conservation, est constant : il exige un compromis entre ces divers besoins.

Le *tourisme de masse*, en concentrant les foules, entraîne des perturbations de la température et de l'humidité relative des musées, en plus d'un accroissement des volumes de déchets, une consommation accrue d'énergie et d'eau. Il représente un danger physique majeur pour les œuvres exposées dans les musées et une usure prématurée des monuments visités.

Une simulation des *effets du climat extérieur passé, présent et futur sur l'intérieur d'une église-modèle non chauffée ni climatisée* a englobé le territoire français<sup>3,4</sup>. Cette simulation du climat intérieur a été construite à partir de séries de données historiques (plus de 100 ans), de données du présent (moins de 50 ans) et de projections du modèle de climat extérieur REMO dans le scénario A1B du 4<sup>ème</sup> Rapport du GIEC, pour les 100 prochaines années. Le climat intérieur simulé est couplé aux fonctions de dommage pour prédire le risque de dommage biologique, chimique et mécanique aux objets. Le monument a été virtuellement placé dans 468 localisations en Europe. Les projections pour la France peuvent être déduites des cartes ainsi obtenues (*Fig. 1 à 5*) :

- Un *accroissement de la température* (*Fig. 1*), dans le futur proche (*Fig. 1b*), plus marqué dans le futur lointain (*Fig. 1c*) ;
- Un *accroissement de l'humidité relative* (*Fig. 2*) dans le futur proche (*Fig. 2b*), plus important dans le futur lointain (*Fig. 2c*) ;
- Une *stabilité de la croissance des moisissures* dans le futur proche et lointain (*Fig. 3*) ;
- Une *dégradation mécanique du bois possible* (*Fig. 4*) ;
- Une *dégradation mécanique d'une couche picturale probable* dans le futur lointain (*Fig. 5*).

Cependant, le niveau d'incertitude de ces cartes de risque est si élevé que les approches déterministes ont de sévères limitations et que des recherches sont nécessaires pour évaluer les niveaux d'incertitude introduits à chaque étape de la modélisation<sup>5</sup>.

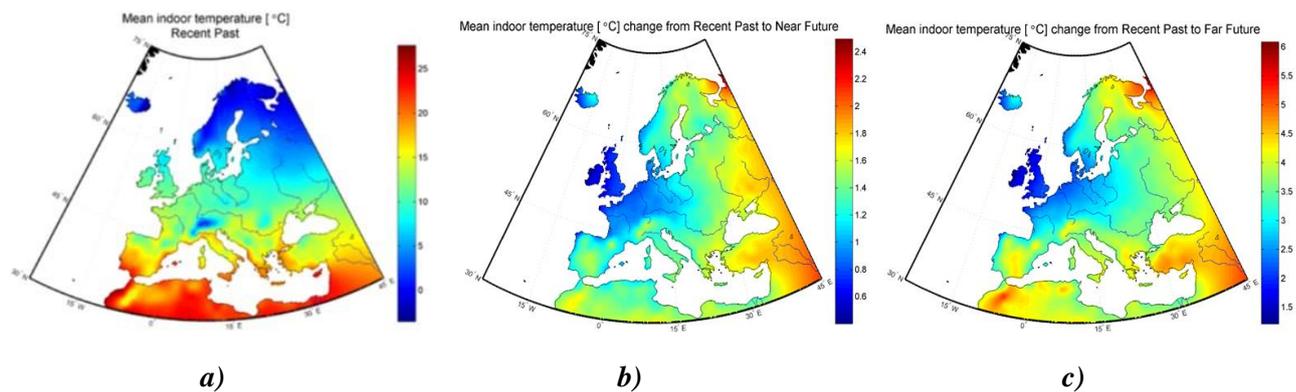


Fig. 1 – **Température moyenne** (°C) à l'intérieur d'une **église-témoin**, non chauffée et non climatisée, lorsqu'elle est placée virtuellement à travers l'Europe : **a)** dans le **passé récent** ; et variation **b)** du **passé récent au futur proche** et **c)** du **passé récent au futur lointain**<sup>3</sup>  
(NB : Les échelles sont différentes d'une carte à l'autre)

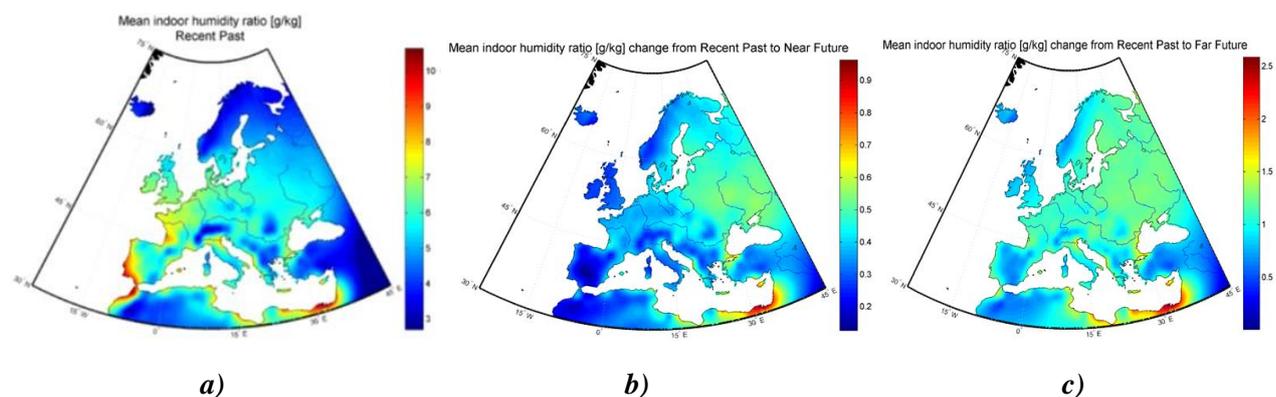


Fig. 2 – **Taux d'humidité relative** à l'intérieur d'une **église-témoin**, non chauffée et non climatisée, lorsqu'elle est placée virtuellement à travers l'Europe : **a)** dans le **passé récent** ; et variation **b)** du **passé récent au futur proche** et **c)** du **passé récent au futur lointain**<sup>3</sup>  
(NB : Les échelles sont différentes d'une carte à l'autre)

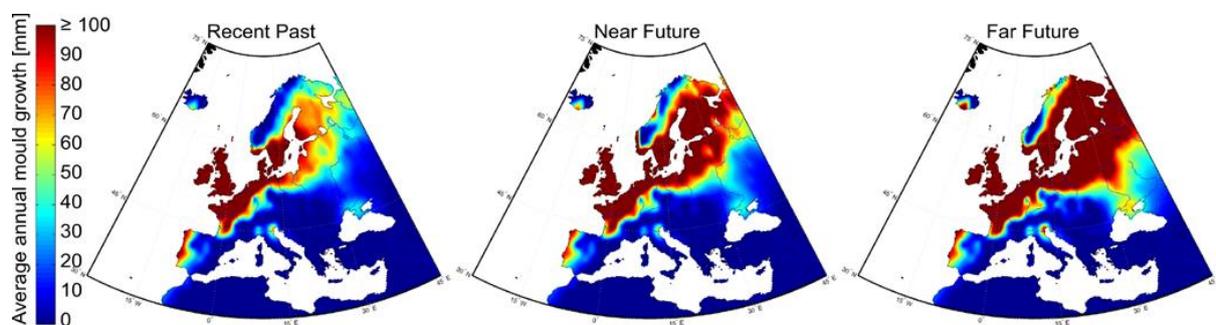


Fig. 3 - **Croissance moyenne annuelle projetée** (en mm) des **moisissures** dans le **passé récent**, le **futur proche** et le **futur lointain** à l'intérieur d'une **église-témoin**, non chauffée et non climatisée, lorsqu'elle est placée virtuellement à travers l'Europe<sup>3</sup>

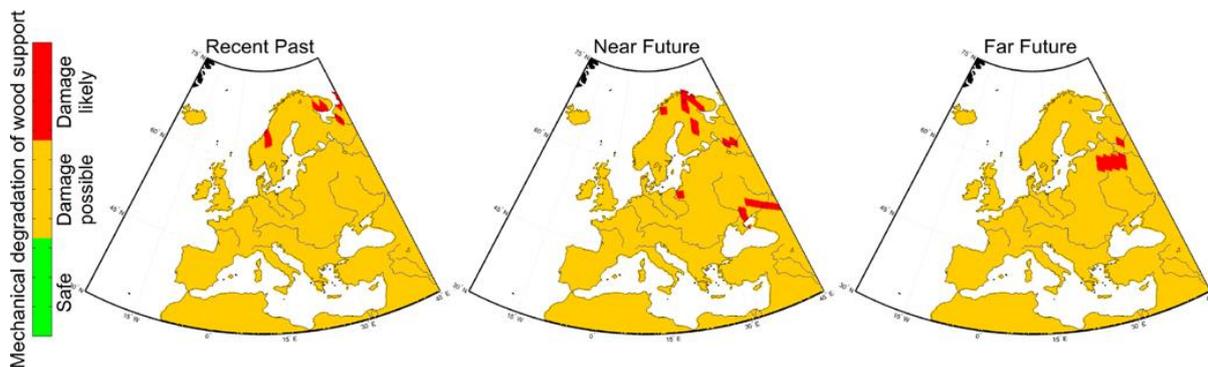


Fig. 4 – Prédiction de la dégradation mécanique d'un support en **bois** dans le **passé récent, le futur proche et le futur lointain** à l'intérieur d'une **église-témoin**, non chauffée et non climatisée, lorsqu'elle est placée virtuellement à travers l'Europe<sup>3</sup>.

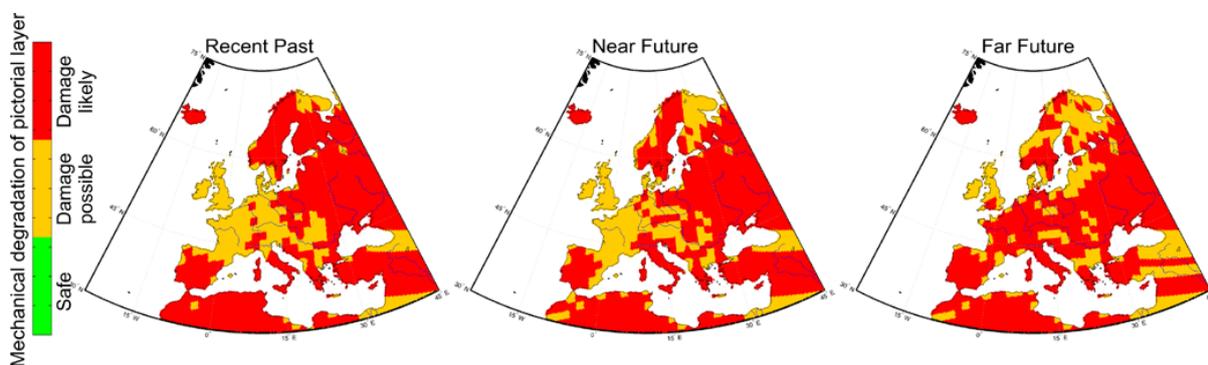


Fig. 5 - Prédiction de la dégradation mécanique d'une **couche picturale** dans le **passé récent, le futur proche et le futur lointain** à l'intérieur d'une **église-témoin**, non chauffée et non climatisée, lorsqu'elle est placée virtuellement à travers l'Europe<sup>3</sup>

Un climat plus chaud devrait potentiellement augmenter le nombre d'*insectes nuisibles* dans les biens historiques et leur déplacement vers le nord à la faveur d'hivers moins rigoureux<sup>6, 7</sup> : « poux des livres » (*Liposcelis bostrychophila*), mite (*Tinea pellionella*), anthrène des musées (*Anthrenus spp.*). Cependant, il est grandement probable que l'abondance des insectes ne soit pas uniquement contrôlée par la température extérieure : d'autres facteurs tels que nourriture, habitat, points d'accès, entretien des locaux et climat intérieur peuvent avoir un impact sur les nombres d'insectes et l'infestation des biens.

Les stratégies de réduction de l'empreinte carbone comportent la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique pour l'éclairage (usage de LED), le chauffage, le refroidissement, la ventilation et les transports d'œuvres. D'autres mesures peuvent aussi contribuer aux efforts de réduction : diminution du volume des déchets dans les espaces ouverts au public et dans les ateliers, réutilisation ou recyclage des matériaux, diminution de la consommation d'eau, isolation des planchers et des toits, isolation par l'extérieur (usage de plâtres et enduits hautement isolants), installation de doubles fenêtres ou de doubles vitrages, installation de tuiles photovoltaïques... Cependant, toutes ces mesures ne doivent pas altérer la valeur esthétique des bâtiments historiques. Enfin, le comportement des utilisateurs (employés et visiteurs) joue un rôle essentiel par le choix de la température et de la ventilation des locaux.

### Recommandations concernant les musées, bibliothèques, collections, archives et réserves :

- Réduire la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver, le conditionnement de l'air en été, la ventilation, et pour le transport lointain des œuvres d'art ;
- Sortir rapidement de l'utilisation du fioul et du gaz fossile ;
- Amplifier l'usage des LED pour l'éclairage des œuvres, des salles d'exposition et des lieux de culte ;
- Supprimer définitivement les bougies qui émettent des suies contribuant au noircissement et à la salissure des œuvres, en particulier les peintures murales, les fresques, les tapisseries et les vitraux des églises ;
- Faire le bilan thermique des bâtiments abritant des biens culturels ;
- Faire le bilan carbone des travaux de maintenance-restauration pour optimiser le choix des matériaux et des modes de transport ;
- Réaliser l'isolation thermique des bâtiments et de leurs toits, au minimum par des doubles vitrages, en respectant leur histoire, leur architecture et leur esthétique ;
- Couvrir les cours intérieures des édifices par des verrières qui réduiraient de 40% les surfaces des bâtiments exposées à l'air extérieur ;
- Développer et installer des capteurs d'alerte dans les monuments ;
- Protéger spécifiquement les matériaux fragiles et vulnérables aux variations de température et d'humidité : le bois, le papier, les textiles, les polymères, les films, les œuvres d'art contemporaines ;
- Protéger les collections contre les infestations biologiques qui sont favorisées par l'augmentation des températures ;
- Surélever les compteurs électriques, les prises de courant et les appareils électriques, dans les régions inondables.

### Références

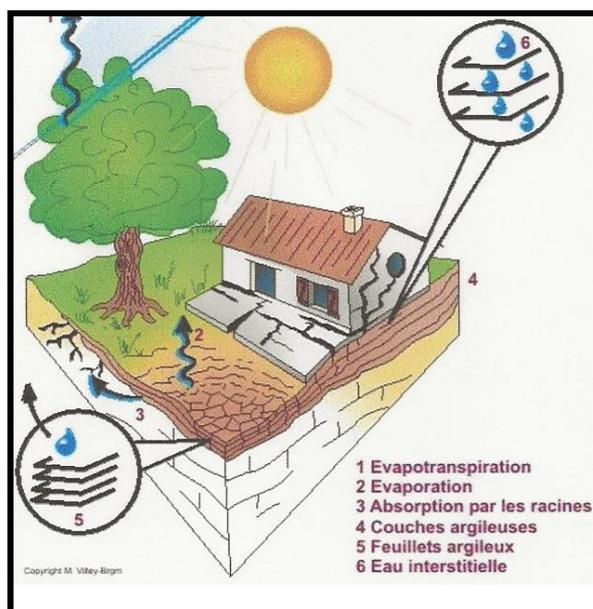
- <sup>1</sup> Bratasz, L., Harris, I., Lasyk, L., Łukomski, M., Kozłowski, R., 2012: Future climate-induced pressures on painted wood, *Journal of Cultural Heritage*;13, 365–370.
- <sup>2</sup> Camuffo, D., Bertolin, C., 2016: Climate change and indoor environments, *Cultural Heritage from Climate Change to Global Change*, Edipuglia, Publ., Bari, 51-61.
- <sup>3</sup> Huijbregts, Z., Martens, M., van Schijndel, A., Schellen, H., 2013: The use of computer simulation models to evaluate the risks of damage to objects exposed to varying indoor climate conditions in the past, present, and future, in *Climate for Collections, Standards and Uncertainties, Postprints of the Munich Climate Conference, 2012*, J. Ashley-Smith, A. Burmester & M. Eibl, Eds, Archetype Publications Ltd, London, & Doerner Institut, Munich, Publ., 375-387.
- <sup>4</sup> Huijbregts, Z., Martens, M., van Schijndel, A., Schellen, H., 2013: Computer modelling to evaluate the risks of damage to objects exposed to varying indoor climate conditions in the past, present, and future, in: *Contributions to building physics : Proceedings of the 2<sup>nd</sup> central European conference on building physics*, Vienna, Austria.
- <sup>5</sup> Leijonhufvud, G., Kjellström, E., Broström, T., Ashley-Smith, J., Camuffo, D., 2013 :Uncertainties in damage assessments of future indoor climates, , in *Climate for Collections, Standards and Uncertainties, Postprints of the Munich Climate Conference, 2012*, J. Ashley-Smith, A. Burmester & M. Eibl, Eds, Archetype Publications Ltd, London, & Doerner Institut, Munich, Publ., 405-418
- <sup>6</sup> Lankester, P., Brimblecombe, P., 2012: Future thermos-hygrometric climate within historic houses, *Journal of Cultural Heritage*, 13, 1-6.
- <sup>7</sup> Brimblecombe, P., Truth-Brimblecombe, C., 2014: Trends in insect catch at historic properties, *J. Cult. Her.*, DOI: 10.1016/j.culher.2014.05.00

## La stabilité des édifices monumentaux sur sols argileux en France

La stabilité structurale des monuments et édifices culturels est un enjeu à prendre en compte dans le contexte du changement climatique. Elle peut être compromise dans certaines situations : gonflement-rétraction des argiles du sol, glissements de terrains, inondations fluviales, érosion côtière...

Sous une construction, l'évaporation de l'eau du sol ne peut se produire qu'en périphérie. Il apparaît alors un gradient entre le centre du bâtiment et sa périphérie, et des mouvements différentiels s'en suivent. Contrairement aux phénomènes de tassement par consolidation, ces effets ne s'atténuent pas avec le temps, mais augmentent quand la structure perd de sa rigidité <sup>1</sup>.

Le phénomène de retrait-gonflement n'affecte que les sols riches en minéraux argileux gonflants-rétractants (smectites). L'évapotranspiration des arbres a un rôle prépondérant dans le déclenchement du phénomène : les racines soutirent l'eau et assèchent le sol en profondeur. De son côté, la simple évaporation (en relation avec la température de l'air, l'insolation, le vent) affecte une tranche de sol très superficielle (1 à 2 m) et se traduit par des transferts d'eau. Il y a retrait avec fissuration horizontale et surtout tassement vertical (*Fig. 1*) <sup>1</sup>.



*Fig. 1 – Mécanismes de fissuration des murs dus au retrait-gonflement des argiles dans les sols* <sup>1</sup>

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) est chargé de l'établissement des *cartes d'aléa retrait-gonflement des sols argileux* <sup>1</sup>. Le patrimoine culturel bâti pourrait être concerné par cet aléa et par son recensement, ainsi que par l'inventaire des mesures préventives à prendre dans le contexte du changement climatique. Cependant, d'après le BRGM, ce phénomène se manifesterait surtout sur des constructions individuelles légères, ancrées peu profondément, ce qui n'est pas le cas général des grands monuments, mais pourrait être celui des petits édifices du patrimoine vernaculaire.

Le projet « *Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions* » (ARGIC) <sup>2</sup> du BRGM s'inscrit dans la continuité d'un effort général de recherche appliquée qui a connu un très net regain d'activité suite à la vague de sécheresse de l'été 2003. Une *cartographie* des mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols a été dessinée en se basant sur le nombre d'arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pris par les administrations françaises (Fig. 2) <sup>3</sup>. Cette carte se superpose à celle de la répartition des affleurements argileux d'âge secondaire (en bleu et vert) et tertiaire (en jaune) sur la carte géologique de la France, essentiellement dans le Bassin parisien, le Bassin d'Aquitaine, le Jura, les Limagnes de Loire et d'Allier, et les Alpes maritimes (Fig. 3). Bien que rien de spécifique au patrimoine culturel bâti n'apparaisse sur cette carte, celle-ci pourrait être un guide utile aux responsables de ce patrimoine, dans le cadre du changement climatique, pour inventorier les risques et prévenir les dégradations (fissures) déjà présentes ou potentielles sur les monuments et édifices culturels situés dans les régions argileuses, ces zones étant déjà bien localisées sur cette carte.

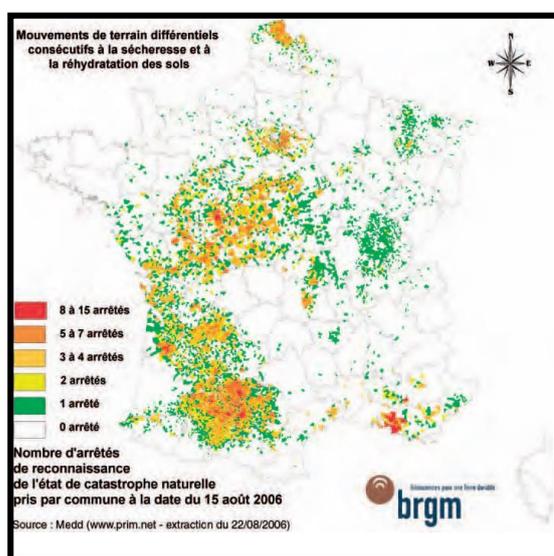


Fig. 2 – *Mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Nombre d'arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au 15 août 2006* <sup>3</sup>

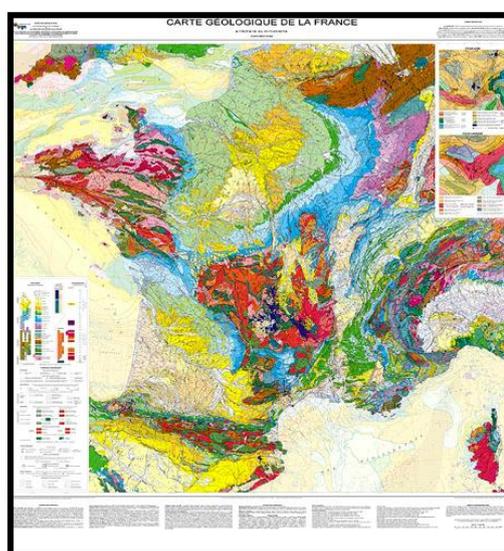


Fig. 3 – *Carte géologique de la France au 1 : 1 000 000<sup>ème</sup>* (Ed. du BRGM)

L'ampleur des sinistres imputés à ce phénomène est très grande : plus de 8 000 communes françaises touchées pour le seul été 2003 qui a vu une canicule et une sécheresse importantes <sup>3</sup>. L'aggravation probable des sécheresses en France, consécutive au dérèglement climatique, aura des effets sur la teneur en eau des sols de fondation et sur la végétation alentours, et se répercutera donc la stabilité des édifices.

Le projet ClimSec <sup>4,5</sup>, réalisé par la Direction de la Climatologie de Météo-France, a modélisé ces relations sécheresse-changement climatique selon plusieurs scénarios du GIEC. Il reprend les estimations de l'Association Française de l'Assurance <sup>6</sup> fondées sur deux scénarios du 5<sup>ème</sup> Rapport du GIEC. Selon le scénario RCP 4.5, les dommages annuels consécutifs aux événements climatiques devraient doubler d'ici 2050 : le changement climatique seul en expliquerait 20%.

L'influence du changement climatique sur la stabilité des constructions sur sols argileux, par le biais de la sécheresse affectant ces sols, étant très probable, il n'y a pas de raison qu'elle ne concerne pas aussi les édifices culturels, particulièrement les plus modestes et surtout ceux dont les fondations ne sont pas profondément ancrées.

### Références

- <sup>1</sup> BRGM, 2016: Le retrait-gonflement des argiles, [https://www.brgm.fr/sites/default/files/dossier-actu\\_argiles.pdf](https://www.brgm.fr/sites/default/files/dossier-actu_argiles.pdf)
  - <sup>2</sup> ARGIC, 2006-2009 : Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions, BRGM, Rapport final, 92 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57011-FR.pdf>
  - <sup>3</sup> ONERC , 2007 : Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, *La Documentation française*, 97 p.
  - <sup>4</sup> Soubeyroux J.-M., Vidal J.-P., Najac J., Kitova N., Blanchard M., Dandin P., Martin E., Pagé C., Habets F. (2011). Projet ClimSec : Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet. [https://www.umrcnrm.fr/IMG/pdf/2011\\_fmaif\\_rapport\\_final\\_v2.2.pdf](https://www.umrcnrm.fr/IMG/pdf/2011_fmaif_rapport_final_v2.2.pdf)
  - <sup>5</sup> Gourdier, S., Plat, E., 2018 : Impact du changement climatique sur la sinistralité due au gonflement des argiles, *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Champs-sur-Marne, 8 p.
  - <sup>6</sup> Caisse Centrale de Réassurance, 2015 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles. <https://www.ccr.fr/documents/23509/29230/Etude+climat.pdf/>
-

***Synthèse des impacts potentiels du changement climatique  
sur le patrimoine culturel français et des maladaptations à éviter***

Le patrimoine culturel matériel français est menacé essentiellement par les ***impacts lents*** suivants du changement climatique :

- La hausse des *températures* et des teneurs de l'air en *CO<sub>2</sub>* augmentant *l'acidité des pluies* et donc la *dissolution des carbonates* des façades ;
- le *thermoclastisme* dû à un ensoleillement intense ;
- la lixiviation et la corrosion des *vitraux anciens* ;
- les remontées d'eaux chargées de *sels* dans les sols et les murs entraînant une dégradation physique et esthétique;
- le gonflement-rétraction des *argiles* dans les sols, lié aux alternances d'épisodes de précipitations et de sécheresses intenses, mettant en danger la stabilité des édifices et monuments;
- les *inondations* et les *étiages* fluviaux;
- la *montée des eaux marines* en zones littorales ou insulaires avec érosion des côtes et invasion des zones continentales par les eaux marines salées;
- la hausse des *températures intérieures* des musées, bibliothèques et collections favorisant les *infestations biologiques* et perturbant toute la *climatologie intérieure* avec des répercussions sur la conservation des œuvres ;
- la *corrosion des métaux* et du *béton* (ciment et armatures métalliques) ;
- la dégradation du *bois* ;
- la migration des *zones climatiques* avec un impact sur la distribution et la saisonnalité des végétaux dans les parcs, jardins et paysages culturels...

Cependant, les effets du *gel-dégel* sur des matériaux poreux humides seront en recul du fait des hausses de température.

...mais ce sont surtout les ***événements extrêmes*** comme les tempêtes, les tornades, les pluies intenses et les submersions associées, les crues subites (flash-flow), les canicules, les incendies qui agressent brutalement les biens, en particulier culturels.

On veillera à éviter toute ***mal-adaptation*** qui est produite, par exemple :

- en *végétalisant massivement* les façades et les toits-terrasses des édifices du patrimoine, altérant ainsi leur esthétique originelle ;
- en touchant l'architecture et les motifs décoratifs des façades lors de *chantiers d'isolation des bâtiments par l'extérieur* ;
- en utilisant des *matériaux sombres* (à faible albédo) dans les constructions nouvelles, le matériel urbain et les revêtements de chaussées;
- en *arrosant massivement* le pied des murs pour refroidir l'atmosphère environnante, entraînant des remontées d'eau chargée de sels ;
- en *arrosant* les matériaux poreux en période de *gel* ;
- en *éloignant considérablement les réserves* des musées et des archives, les ateliers de restauration des œuvres, entraînant des transports longs et répétés, source d'émissions de polluants et de gaz à effet de serre ;
- en forçant les systèmes de *rafraîchissement de l'air* en été et de *chauffage* en hiver



*Conclusion générale :*

*Vers une stratégie française d'adaptation*

*du patrimoine monumental*

*aux impacts du changement climatique*



Nous terminerons par des *Recommandations* suggérant des mesures stratégiques à prendre dans divers domaines relevant de *la politique scientifique et réglementaire pour une adaptation idéale du patrimoine culturel matériel français au changement climatique*. Elles ont été élaborées à partir de l'analyse de la situation de ce patrimoine vis-à-vis du changement climatique et de son évolution prévisible exposées plus haut dans cette brochure. Ainsi devrait-on définir et appliquer :

***Une politique générale de la recherche*** sur l'adaptation du patrimoine culturel au changement climatique en renforçant d'abord la *coopération européenne* (Joint Programming Initiatives Cultural Heritage and Climate, Heritage Portal, Programme H2020 de la Commission Européenne...) et *mondiale* (UNESCO, ICOM, ICOMOS, ICROM, Future Earth...).

***Une recherche fondamentale et appliquée*** avec de nombreuses approches spécifiques :

- Développer en France les *recherches sur les interactions entre changement climatique et patrimoine culturel matériel*, qui sont encore embryonnaires ;
- Renforcer la coopération entre d'une part les *disciplines du climat et de la qualité de l'air*, et d'autre part celles *des matériaux et de la restauration-conservation* ;
- Reconstruire des *séries climatiques passées* à partir d'archives écrites, de relevés instrumentaux et par l'étude dendroclimatologique des bois afin de valider les modèles prédictifs d'évolution du climat ;
- Appliquer les divers modèles climatiques dans les *scénarios RCP* du 5<sup>ème</sup> (2014) et *SSP-RCP* (2021) du 6<sup>ème</sup> Rapport du GIEC ;
- Utiliser les *Services climatiques (DRIAS et MétéoHD)* pour disposer de projections régionalisées ;
- Elaborer des *cartes climatiques* à haute résolution par descente d'échelle ;
- Dessiner des *cartes de risques et de dommages* à haute résolution pour divers matériaux, pour diverses régions et villes dans divers modèles et scénarios ;
- Appliquer les modèles des  *futures émissions de polluants* ;
- Développer de nouvelles *Fonctions Dose-Réponse* et de nouvelles *Fonctions de Dommage* pour les matériaux ;
- Développer les recherches spécifiques sur les impacts du changement climatique sur les *métaux et les bétons* (carbonatation du ciment corrosion des armatures métalliques) ;
- Développer la recherche sur les *modèles prédictifs de transferts extérieur-intérieur* ;
- Combiner les *simulations* au laboratoire et sur les sites du patrimoine culturel.

***Un enseignement et une formation***, s'agissant essentiellement de :

- Mettre à profit l'intérêt grandissant des *élèves et étudiants des écoles, des collèges, des lycées, des universités et des grandes écoles* pour la protection de l'environnement et du climat (les marches et grèves pour le climat) et pour le patrimoine (les Journées européennes du patrimoine), en l'illustrant par les impacts du changement climatique sur ce patrimoine ;
- Développer des programmes de *formation initiale* sur le changement climatique, ses impacts et l'adaptation du patrimoine culturel mobilier et immobilier, dans *l'Enseignement supérieur* sur le Patrimoine, l'Architecture et les Arts décoratifs ; dans les Masters sur le Patrimoine, l'Environnement, la Géographie et l'Urbanisme ; dans les Doctorats ;
- Développer la *formation continue* des professionnels du patrimoine sur les risques liés au changement climatique et sur l'adaptation.

*Une politique nationale et locale, financière et économique.* Il s'agit ici de :

- Contribuer au *financement* des programmes de recherche européens et nationaux sur l'adaptation du patrimoine culturel matériel au changement climatique ;
- Généraliser les politiques et les budgets de *maintenance continue* et de *conservation préventive* du patrimoine culturel ;
- Développer au *niveau local et opérationnel*, par exemple au niveau des DRAC, une préoccupation constante concernant le changement climatique pour l'avenir du patrimoine culturel.
- Etablir des *plans d'urgence climatique* pour les bâtiments culturels ;
- Evaluer l'*impact socio-économique* de l'adaptation du patrimoine culturel au changement climatique ;
- Evaluer le *coût* des mesures d'adaptation.

Le plus important serait de *rattraper le retard actuel pris en France*, par rapport aux voisins italiens, anglais et allemands, dans les recherches sur les impacts du changement climatique sur le patrimoine culturel. En témoigne le peu d'exemples et de cas d'études que nous avons pu citer concernant le patrimoine français et le peu d'équipes de recherche françaises qui s'y consacrent. Cela apporterait de plus des résultats plus rigoureux et plus précis que les généralités concernant ces impacts à l'échelle du globe ou de l'Europe.

Il manque encore en France *une grande mobilisation du secteur culturel* pour donner à voir et comprendre l'histoire passée du climat, ses changements récents, les projections à venir, les bâtiments culturels dans leur territoire, leur résilience aux crises passées et leur avenir en termes de conservation-restauration. Le potentiel est immense, non seulement du strict point de vue patrimonial, mais aussi du point de vue socio-économique en rapport avec le tourisme culturel ou de masse.

Une phrase du Rapport Dantec-Roux au Sénat en 2019 prend ici tout son sens : « *Il faut cesser de croire que les impacts du réchauffement climatique sont des phénomènes trop lointains ou incertains pour qu'il soit nécessaire ou possible de s'y préparer* ».

Le chantier qui s'est ouvert à Notre-Dame de Paris, à la suite de l'incendie du 15 avril 2019, devrait être l'occasion de la prise en compte des impacts du changement climatique sur ce monument emblématique, patrimonial et religieux. Une restauration n'est pas seulement un geste architectural, c'est aussi donner une nouvelle vie à un édifice qui est fonctionnel car fréquenté par de nombreux fidèles et de nombreux touristes. La modélisation des futurs échanges extérieur-intérieur dans la cathédrale dans le contexte du changement climatique doit être faite, ne serait-ce que pour prévoir une isolation efficace du futur toit, après que ses matériaux et ceux de la charpente auront été choisis, et pour concevoir et dimensionner les futures installations de chauffage en hiver et de climatisation en été. Ce chantier de Notre-Dame de Paris devrait aussi servir d'exemple pour les recherches fondamentales et appliquées concernant le patrimoine culturel français dans son ensemble face au dérèglement climatique mondial. Il devrait aussi contribuer à la résilience parisienne dans le contexte post-crise suite à la pandémie due au Corona virus au printemps 2020.

---

## Post-face : remerciements

Ce texte trouve son origine en 2015, à l'occasion de la COP 21 de Paris, dans les travaux d'un Groupe de Travail réuni au ministère de la Culture et de la Communication par Astrid Brandt-Grau, Chef du Département de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur. Je remercie les collègues suivants qui ont participé à ces travaux directement ou indirectement : Anda Ionescu (Université Paris-Est Créteil) ; Beatriz Menendez (Université de Cergy-Pontoise) ; Elisabeth Ballu, Sylvie Max-Colinart et Pascal Liévaux (Ministère de la Culture et de la Communication) ; Bertrand Lavédrine et Véronique Rouchon (Centre de Recherche sur la Conservation) ; Elisabeth Marie-Victoire, Isabelle Pallot-Frossard et Véronique Vergès-Belmin (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques) ; Michel Menu (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France) ; Michel Déqué, Julien Desplat et Daniel Martin (Météo France).

Astrid Brandt-Grau, Beatriz Menendez, Raphaëlle Kounkou-Arnaud (Météo France) et Dario Camuffo (Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima, Padoue) ont aimablement relu, amélioré ou amendé le texte initial avec patience et compétence.

Valérie Masson-Delmotte, co-présidente du Groupe I du GIEC, a relu, corrigé et enrichi largement ce texte, après m'avoir encouragé à persévérer dans mon entreprise d'éveil de la communauté française du patrimoine aux enjeux du dérèglement climatique. C'est pour cette communauté un soutien scientifique important dont je lui suis reconnaissant.

Je remercie enfin vivement ICOMOS-France et ICOMOS-International, spécialement leurs directrices Isabelle Palmi et Marie-Laure Lavenir d'avoir offert à ce texte l'hospitalité de leurs sites informatiques, lui assurant ainsi une large diffusion dans la communauté du patrimoine culturel.

Je ne résiste pas à reproduire pour terminer la réponse que Stéphane Bern m'a fait transmettre en réponse à mon interpellation p. 6 de mon Introduction : « *Stéphane Bern vous remercie de votre très bonne analyse qu'il partage. Il tient à vous dire qu'il s'efforcera dans l'avenir d'alerter les responsables et propriétaires de Monuments Historiques aux enjeux climatiques* ». Les idées avancent.

-----