

Patrimoine culturel bâti et changement climatique

Built Cultural Heritage and Climate Change

R.-A. LEFÈVRE⁽¹⁾

Résumé

L'introduction des sorties des modèles climatiques dans des Fonctions Dose-Réponse permet de faire des projections sur la dégradation lente et à long terme du patrimoine culturel bâti. Le projet européen « Noah's Ark » a ainsi étudié, en utilisant cette méthodologie, l'érosion des façades en calcaire par la pluie, le noircissement des façades en pierres de toute nature abritées de la pluie, la corrosion des métaux et, enfin, la bio-colonisation des façades. La même méthodologie a été appliquée par ailleurs au *soiling* du verre moderne et à la lixiviation des vitraux médiévaux. Les effets sur les pierres poreuses de la climatologie des transitions de phases salines et du gel-dégel ont aussi été projetés en croisant les sorties des modèles climatiques avec les propriétés des sels et de l'eau. La précision et la fiabilité des projections climatiques et de qualité de l'air, ainsi que celles de leurs impacts potentiels sur le patrimoine culturel bâti, devraient être améliorées par l'utilisation simultanée de multiples modèles climatiques et par de meilleures projections sur les futures émissions-concentrations de polluants.

Mots-clés

Fonctions Dose-Réponse, érosion des façades, noircissement des façades, corrosion des métaux, biomasse, verre, vitraux, sels, gel-dégel.

Abstract

Outputs of climate models introduced into Dose-Response Functions allow the projection of the slow weathering of built cultural heritage on the long-term. The "Noah's Ark" European project studied by using this methodology: the erosion by rain of the façades in limestone, the darkening of any kind of stone in the façades, the metal corrosion and the biomass accumulation on façades. Otherwise the same methodology was applied to the soiling of modern glass and the lixiviation of mediaeval stained-glass. The effects on porous stones of the climatology of salt transitions and of freeze-thaw were projected by crossing the outputs of climate models with the properties of salts and water. The accuracy and reliability of climate and air quality projections and of their effects on built cultural heritage would be improved by the use of multiple climate models and better projections of future emissions-concentrations of pollutants.

Keywords

Dose-Response Functions, façades recession, soiling, metals corrosion, biomass, glass, stained-glass, salts, freeze-thaw.

La prévision à long terme de la survenue d'évènements climatiques brusques, courts, intenses, spectaculaires et dévastateurs (tempêtes, tornades, inondations, canicules...) sur les édifices et les objets du patrimoine culturel est aléatoire, alors que celle de phénomènes lents, progressifs, insidieux et finalement très péjoratifs, est prévisible car inéluctable, fondant ainsi et justifiant une stratégie d'adaptation pour une conservation préventive du patrimoine culturel prenant en compte les projections sur l'évolution du climat et de la qualité de l'air. Un exposé de cette problématique ayant été récemment publié dans la revue *La Météorologie* [1], on en trouvera ci-dessous une synthèse mise à jour et des compléments.

La relation entre les changements du climat et de la pollution atmosphérique d'une part, et la dégradation lente à long terme du patrimoine culturel bâti d'autre part, a été abordée récemment dans deux grands projets européens : « Noah's Ark » (2003-2007) [2], qui s'est focalisé sur le patrimoine de plein air (les façades des monuments), et « Climate for Culture » (2010-2014) [3], plutôt tourné vers l'intérieur des édifices et les objets qui y sont exposés ou entreposés. Hors du cadre de ces deux grands projets, trois autres champs concernant patrimoine, climat et pollution ont été explorés : le comportement prévisible du verre et des vitraux, les actions prévisibles des sels et les impacts des cycles de gel-dégel sur la pierre.

(1) Professeur émérite à l'université Paris-Est Créteil.

Toutes ces démarches, à l'exception de celles qui concernent les cristallisations salines et le gel-dégel, ont une méthodologie commune : l'introduction des sorties des modèles climatiques dans des Fonctions de Dommage (ou Fonctions Dose-Réponse : FDR). Ces dernières sont des équations qui permettent de prévoir le comportement d'un matériau placé dans des conditions nouvelles, climatiques et environnementales, actuelles ou futures, ou même de reconstituer son comportement passé. Les doses sont celles qui seront délivrées par l'environnement dans lequel sera placé le matériau : paramètres météorologiques (température, humidité relative de l'air, hauteur des pluies, temps de mouillage...) et paramètres environnementaux (concentrations des polluants gazeux et particulaires, pH des pluies...). Elles sont établies à partir soit de grandes campagnes d'exposition de matériaux à des environnements actuels variés, soit à partir d'expositions en laboratoire dans des chambres de simulation. Cependant, pour l'étude de l'action des sels, ce ne sont pas des FDR mais les propriétés thermodynamiques de ceux-ci, qui sont sujettes à des effets de seuil de température et d'humidité, qui sont confrontées aux sorties des modèles climatiques concernant ces derniers deux paramètres.

L'ensemble des projections de dommages aux matériaux aux horizons 2070 et 2099 étudiés dans le projet Noah's Ark a donné lieu à la production d'un atlas [4] rassemblant des cartes de risque correspondant à ces deux périodes et à des cartes des changements par rapport à une période de référence (1961-1990).

Seuls les résultats du projet « Noah's Ark » sont publiés en détail à ce jour. Ils concernent : l'érosion des façades en calcaire par la pluie, le noircissement (*soiling*) des façades en pierres de toute nature abritées de la pluie, la corrosion des métaux et, enfin, la biocolonisation des façades. Toutes ces recherches

ont utilisé le modèle climatique anglais Hadley [5] dans le scénario A2 du GIEC et différentes FDR, en particulier celles établies dans le Programme International Coopératif des Nations Unies sur les « Effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux » [6].

Ainsi, les projections pour le xx^{e} siècle montrent que, bien que les pluies et la pollution doivent décroître, l'érosion des façades en calcaire à Londres [7] devrait rester importante par la combinaison de températures et de concentrations en CO_2 plus élevées qu'actuellement, produisant des pluies « propres » (pas ou peu polluées) de pH 5-6 en équilibre avec le CO_2 atmosphérique, mais érodant « naturellement » le calcaire à la manière des phénomènes karstiques dans les roches calcaires des affleurements naturels.

Le noircissement des façades abritées de la pluie à Londres [8], quelle que soit la nature des pierres qui les constituent, est lui aussi prévu à la baisse, essentiellement du fait de la réduction drastique de la pollution atmosphérique particulaire (les suies carbonées, en particulier), sauf dans les rues très fréquentées par les engins motorisés utilisant des combustibles fossiles.

La corrosion des métaux en Europe, spécialement l'acier et le zinc, devrait continuer à être dominée par le dépôt des chlorures en zones côtières ou proches des côtes, surtout dans le sud du continent, ces chlorures ayant un impact croissant avec la température [9]. À l'intérieur des terres et dans un futur lointain (2070-2099), la corrosion atmosphérique en environnement extérieur devrait être faible ou modérée.

La biomasse (bactéries, champignons, levures, lichens, mousses...) accumulée sur les façades des monuments devrait augmenter en superficie et en masse dans le nord de l'Europe, du fait de l'augmentation des températures et des précipitations [10], alors qu'au contraire, une forte réduction des précipi-

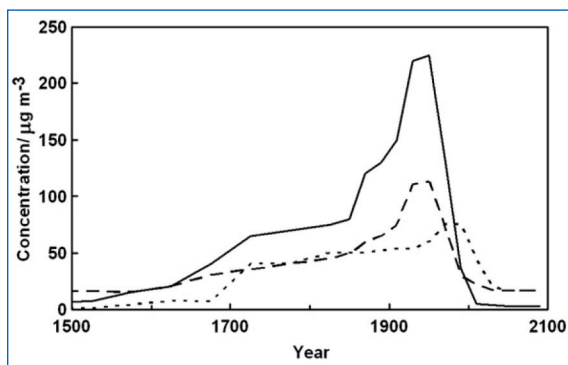


Figure 1.

Concentrations estimées de SO_2 (trait plein), de particules carbonées (trait tireté) et de NO_2 (trait pointillé) à Paris de 1500 à 2100. (Extrait de Ionescu *et al.*, 2012 [12]).

Estimated concentrations of SO_2 (solid line), smoke (dashed line) and NO_2 (dotted line) in Paris from 1500 to 2100. (After Ionescu *et al.*, 2012 [12]).

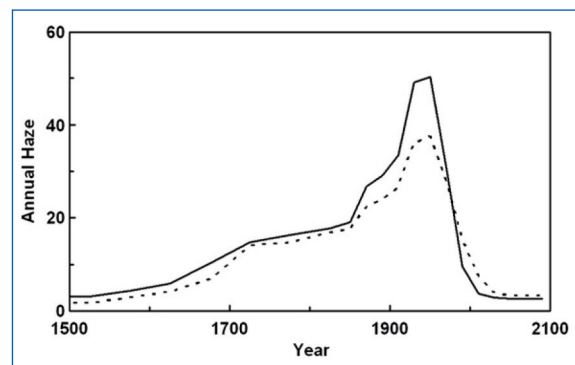


Figure 2.

Développement estimé du flou (en %) d'un verre durable Si-Ca-Na durant la première année d'exposition à l'atmosphère parisienne de 1500 à 2100, en incluant l'effet du NO_2 (trait tireté) et en l'excluant (trait plein). (Extrait de Ionescu *et al.*, 2012 [12]).

Estimated haze development (in %) of a durable Si-Ca-Na glass during the first year of exposure to the Parisian atmosphere from 1500 to 2100, including the effect of NO_2 (dotted line) and excluding it (solid line). (After Ionescu *et al.*, 2012 [12]).



Figure 3.

La Sainte Chapelle de Paris, inscrite sur la liste du Patrimoine mondial de l'UNESCO, rassemble plusieurs types de matériaux soumis aux changements du climat et de la pollution : pierre calcaire érodée à la pluie mais noircissant à l'abri de celle-ci, enduits et mortiers variés, vitraux d'âges et de compositions chimiques différents et donc de durabilités variées, doubles-verrières de protection des vitraux en verre moderne durable, métaux variés (fer, acier, cuivre, plomb...), bois, peintures murales... (cliché : R.-A. Lefèvre).

The Sainte Chapelle in Paris, inscribed on the UNESCO List, consists in several types of materials submitted to the changings of climate and pollution: limestone eroded when unsheltered from rain but soiled when sheltered, various renderings and mortars, stained-glass windows of various ages and chemical compositions and thus of different durabilities, double protective glazings in durable modern glass, various metals (iron, steel, copper, lead...), wood, wall paintings...

tations dans le sud du continent devrait entraîner une forte baisse de la bioaccumulation dans cette région.

Le verre moderne, très durable par sa composition chimique (Si-Ca-Na), ne s'altère guère qu'en se salissant (*soiling*) et en devenant flou lorsqu'il est abrité des pluies lessivantes. Ce dommage devrait s'atténuer considérablement dans l'avenir si l'on applique à Paris les projections climatiques du modèle Hadley [5] et les projections de pollution du modèle GAINS [11] dans le scénario A2 du GIEC, aux Fonctions Dose-Réponse qui le concernent (figures 1 et 2). La parenté des courbes des figures 1 et 2 montre bien que le flou est directement lié à la pollution atmosphérique gazeuse et particulaire et non à la température et à l'humidité relative de l'air [12].

Bien que les vitraux médiévaux (figure 3) soient peu durables, à l'inverse du verre moderne, du fait de leur composition chimique (Si-Ca-K), le dommage principal qui les menace, la lixiviation chimique de K et Ca, même lorsqu'ils sont abrités de la pluie, devrait s'atténuer dans l'avenir à Paris, car elle est dépendante d'une part de l'humidité relative de l'air et, d'autre part, de la pollution atmosphérique gazeuse (SO_2 , NO_2) [12] (figure 4). Il faut noter que les doubles-verrières de protection, que l'on installe depuis quelques décennies sur la face externe des vitraux parisiens, sont au contraire d'eux constituées de verre moderne Si-Ca-Na très durable. Les projections plutôt optimistes sur l'impact du climat et de la qualité de l'air sur la durabilité du verre et des vitraux à Paris devraient

amener à réfléchir sur la réelle nécessité à long terme d'équiper tous les vitraux de doubles-verrières de protection, souvent inesthétiques et toujours onéreuses.

La notion de « climatologie des transitions de phases salines » a été récemment introduite [13] en associant les types de climat de Köppen-Geiger aux dommages potentiels dus aux sels dans les pierres poreuses. Ces dommages sont paramétrés en utili-

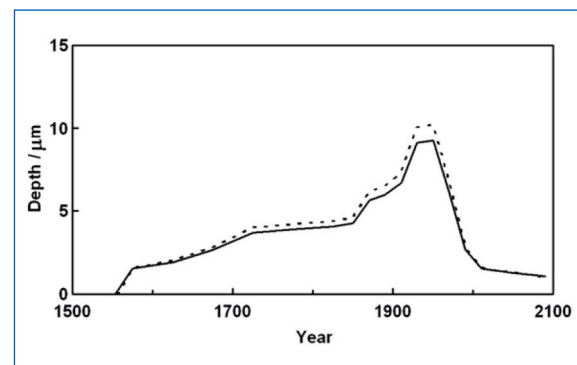


Figure 4.

Épaisseur estimée (en μm), sous la surface d'un vitrail en verre Si-Ca-K, de la couche lixiviée en K (trait tireté) et en Ca (trait plein) la première année d'exposition à l'atmosphère parisienne de 1500 à 2100. (Extrait de Ionescu *et al.*, 2012 [12]).

Estimated thickness (in μm), under the surface of a stained-glass Si-Ca-K, of the layer leached in K (dotted line) and Ca (solid line) the first year of exposure to the Parisian atmosphere from 1500 to 2100. (After Ionescu *et al.*, 2012 [12]).

sant le nombre de cycles de dissolution-cristallisation de systèmes non hydratés (Halite : NaCl) ou hydratés (Thénadite : Na_2SO_4 – Mirabilite : $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), calculé à partir de la température et de l'humidité relative de l'air, et des sorties des modèles climatiques anglais Hadley et français ARPEGE. Les climats tempérés très humides offrent le potentiel le plus élevé de dommages dus aux sels et un plus grand nombre de transitions en été. Mais les régions de l'Europe de l'Ouest au climat très humide devraient voir celui-ci changer pour un climat de type plus méditerranéen ou plus sec, avec une saisonnalité des transitions salines différente.

Les effets de la *gel-dégel* sur les pierres poreuses des monuments et sur les sites archéologiques ont également suscité un intérêt dans le cadre du changement climatique [14]. En effet, si un changement de température de quelques degrés ou d'humidité relative de quelques pour cent ne semble pas *a priori* présenter de risques pour les matériaux, il n'en est pas de même lorsqu'une transition de phase se produit à température donnée avec changement de volume, comme c'est le cas pour l'eau. La plus grande partie de l'Europe tempérée devrait voir une baisse significative du gel dans le futur et donc une baisse significative de la vulnérabilité des matériaux poreux humides. Des températures plus élevées dans

l'Europe du Nord devraient affecter des sites archéologiques préservés jusqu'alors dans le permafrost, ainsi que les fondations des édifices qui sont construits dessus.

Un autre phénomène lent et inéluctable menace le patrimoine culturel : la montée du niveau des océans. Non seulement ceux-ci vont engloutir des édifices situés sur les côtes et dans les zones continentales basses, mais leur envahissement par des eaux salées va perturber tous les équilibres physico-chimiques et biologiques et ainsi modifier la durabilité des matériaux.

Enfin, il reste aussi à étudier de façon plus approfondie l'impact du futur climat sur la microclimatologie à l'intérieur des monuments, ainsi qu'une récente publication vient de l'aborder [15] et que le projet européen « Climate for Culture » [3] se propose de le faire.

En conclusion, comme le soulignent les auteurs de la « Climatologie des transitions salines et ses implications dans l'altération de la pierre » [13], la précision et la fiabilité des projections climatiques et de leurs impacts potentiels sur le patrimoine culturel bâti devraient être améliorées par l'utilisation simultanée de multiples modèles climatiques [16] et par de meilleures projections sur les futures émissions de polluants.

Références

- [1] Lefèvre R.-A., Martin D. Le patrimoine culturel bâti face aux risques du changement climatique, *La Météorologie* 2011 ; 74 : 15-22.
- [2] <http://noahsark.isac.cnr.it>
- [3] <http://www.climateforculture.eu>
- [4] Sabbioni C., Brimblecombe P., Cassar M. (dir.) *The Atlas of climate change impact on European cultural heritage*, London, Anthem Press 2010: 160 p.
- [5] <http://www.metoffice.gov.uk/climate-change/ressources/hadley>
- [6] <http://www.swerea.se/ICP-Materials>
- [7] Brimblecombe P., Grossi C.-M. Millennium-long recession of limestone façades in London. *Environmental Geology* 2008; 56: 463-71.
- [8] Brimblecombe P., Grossi C.-M. Millennium-long damage to building materials in London. *Science of the Total Environment* 2009; 407: 1354-61.
- [9] Tidblad J. Atmospheric corrosion of metals in 2010-2039 and 2070-2099. *Atmospheric Environment* 2012; 55: 1-6.
- [10] Gómez-Bolea A., Llop E., Ariño X. *et al.* Mapping the impact of climate change on biomass accumulation on stone. *Journal of Cultural Heritage* 2012; 13: 254-8.
- [11] GAINS: Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies. <http://gains.iiasa.ac.at>
- [12] Ionescu A., Lefèvre R.-A., Brimblecombe P., Grossi C.-M. Long-term damage to glass in Paris in a changing environment. *Science of the Total Environment* 2012; 431: 151-6.
- [13] Grossi C.-M., Brimblecombe P., Menéndez B. *et al.* Climatology of salt transitions and implications for stone weathering. *Science of the Total Environment* 2011; 409: 2577-85.
- [14] Grossi C.-M., Brimblecombe P., Harris I. Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment* 2007; 377: 273-81.
- [15] Lankester P., Brimblecombe P. The impact of future climate on historic interiors. *Science of the Total Environment* 2012; 417-418: 248-54.
- [16] Déqué M. Temperature and precipitation probability density functions in ENSEMBLES regional scenarios. *ENSEMBLES Technical Report* 2009; 5. http://ensembles-eu.metoffice.com/tech_reports/ETR_5_vn1.pdf