

Famille du média : Médias spécialisés
grand public

Périodicité : Trimestrielle

Audience : 499332

Sujet du média : Sciences & Techniques

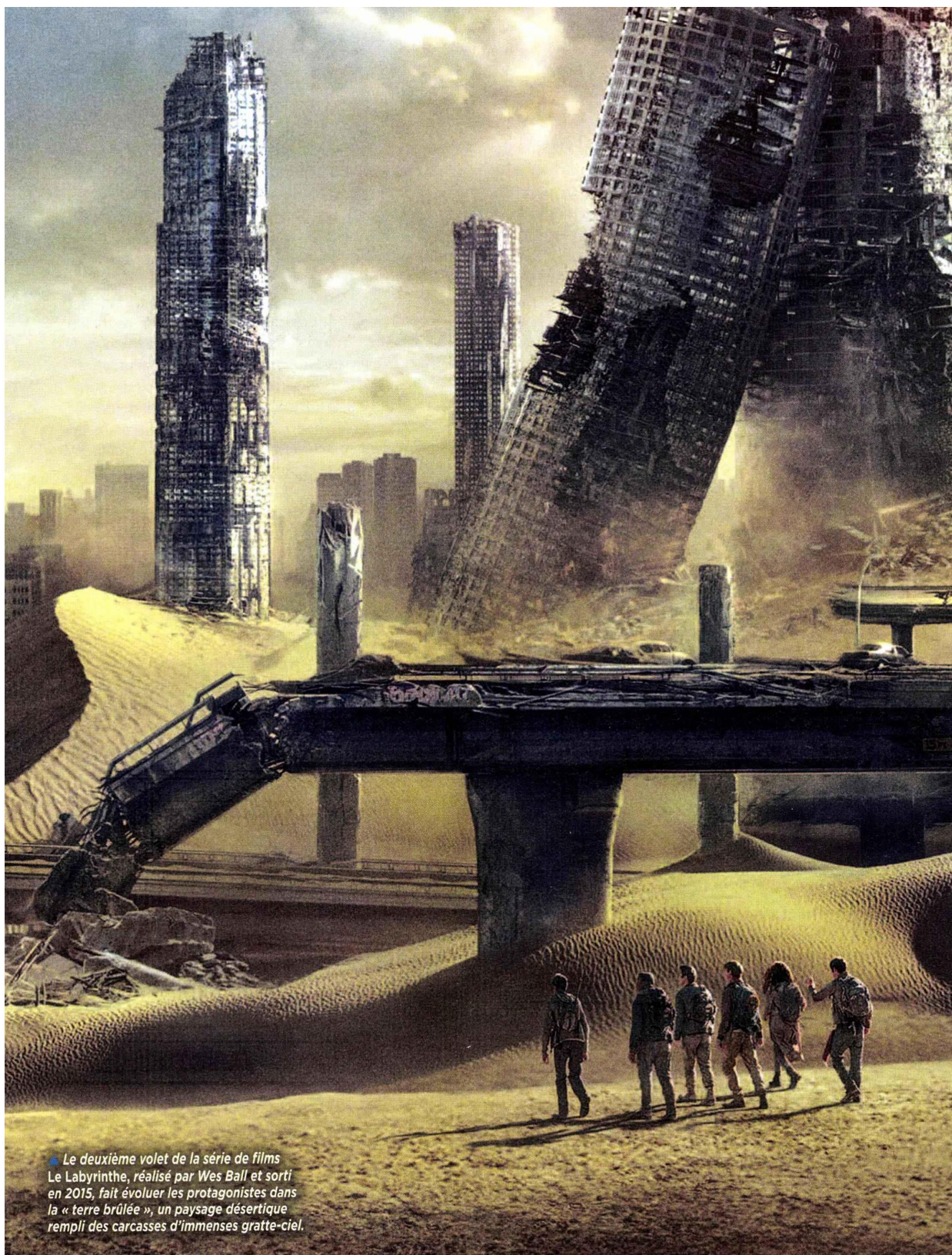


Edition : Octobre - décembre

2022 P.140-145

Journalistes : Alain Musset

Nombre de mots : 3005



Le deuxième volet de la série de films Le Labyrinthe, réalisé par Wes Ball et sorti en 2015, fait évoluer les protagonistes dans la « terre brûlée », un paysage désertique rempli des carcasses d'immenses gratte-ciel.



SCIENCE ET FICTION

Romans, films, BD et jeux vidéo d'anticipation dépeignent les prodigieux cadavres de béton, de pierre et d'acier que deviendraient les villes après la chute de l'humanité. Cette vision est-elle réaliste ? Quel serait le vieillissement de ces matériaux conçus pour défier le temps ?

Archéologie de nos villes après l'apocalypse



Valérie L'Hostis

PHYSICO-CHIMISTE, CEA SACLAY

Experte dans le comportement et le vieillissement des matériaux, elle est directrice de recherche au CEA à Saclay. Elle a coécrit *Pourquoi faut-il toujours repeindre la tour Eiffel?* (EDP Sciences, 2019).



Alain Musset

GÉOGRAPHE, INSTITUT UNIVERSITAIRE DE FRANCE

Spécialiste de science-fiction et des villes latino-américaines, il travaille sur les relations ville-environnement et la justice sociospatiale. Il a publié notamment *Le Syndrome de Babylone* (Armand Colin, 2012).

L'image des ruines futures de New York, Paris ou d'autres villes qui auront incarné la modernité de leur époque imprègne tous les récits postapocalyptiques de science-fiction. Ces descriptions souvent minutieuses de bâtiments effondrés, livrés aux caprices du temps, parfois retournés à l'état sauvage, s'inscrivent dans une perspective ancienne, née à la Renaissance avec la redécouverte de l'Antiquité et développée au XVIII^e siècle après la mise au jour des vestiges de Pompéi. Pour nos civilisations qui se savent mortelles, elles sont un *memento mori* (« Souviens-toi que tu te meurs ») à la fois effrayant et fascinant.

François-René de Chateaubriand, dans *Génie du christianisme* (1802), n'hésitait pas à voir dans les ruines de Rome une beauté surnaturelle qui transcendait l'œuvre des architectes latins : « Les ruines sont plus pittoresques que le monument frais et entier. Les ruines permettent d'ajourer les parois et de lancer au loin le regard vers les nues, les montagnes. » Comme chez tous les romantiques de son époque, la dimension esthétique de ces bâtiments se doublait chez lui d'une fascination morbide pour le temps qui passe. Le Dr Paul Ricci, du roman de l'écrivain britannique J. G. Ballard *Salut l'Amérique!* (1981), exprime les mêmes sentiments quand il découvre à quoi ressemblera, en 2114, la cité qui imposait son rythme à la planète :

« Ainsi, voilà New York, ou ce qu'il en reste. La plus grande cité du XX^e siècle : on y entendait autrefois battre le cœur de la finance internationale, de l'industrie et des loisirs. Aujourd'hui, elle est aussi loin du monde réel que Pompéi ou Persépolis. »

Mettons-nous donc à la place des archéologues du futur (et peut-être d'une autre planète) qui vont découvrir les décombres de notre civilisation des siècles ou des millénaires après la disparition de l'espèce humaine, comme a pu l'imaginer, en 2007, le journaliste américain Alan Weisman dans son essai *Homo disparitus* (*The World Without Us*). La science-fiction ayant sur ce thème exploré tous les scénarios possibles, il s'agit ici de s'intéresser à la façon

dont vont réagir, dans différents environnements, les matériaux utilisés pour construire nos villes et ce qu'il restera d'elles après notre bref passage sur la planète Bleue. Les images les plus impressionnantes de la mort des villes dans la science-fiction sont souvent liées à l'évocation des ruines de ces nouvelles tours de Babel que sont les gratte-ciel de New York, dont le modèle a essaimé sur la planète. Avec minutie, Alan Weisman avait montré qu'au cœur de la Grosse Pomme, les gratte-ciel de béton, de verre et d'acier seraient les premiers affectés par le manque d'entretien, que les ponts finiraient par s'effondrer sous le poids de la rouille, que les eaux envahiraient les tunnels du métro et que les rues se transformeraient en rivières poissonneuses. L'ultime étape de ce processus serait, selon lui, la disparition complète de la ville, envahie par la végétation – disparition correspondant de manière symbolique à la fin de notre

civilisation fondée sur le règne de l'urbain. En cela, l'essayiste n'a fait que reprendre les scénarios envisagés par de nombreux auteurs et autrices de science-fiction, qui ont réduit à l'état de décombres ou de gravats des édifices qui paraissaient pouvoir défier le temps parce qu'ils étaient construits en béton – outil et symbole de notre modernité architecturale. En effet, le béton contemporain, largement utilisé depuis la fin du XX^e siècle, est devenu le principal matériau de construction dans le monde, car les éléments qui le constituent (ciment, eau, sable et granulats) sont présents partout sur la planète et peu chers.

LE RÈGNE FRAGILE DU BÉTON

Cependant, si cet élément résiste très bien lorsqu'on appuie dessus – sa résistance en compression est de l'ordre de 50 mégapascals (MPa) –, il n'est pas performant lorsqu'on essaie de l'étirer – sa résistance en

traction est de 5 MPa. C'est pourquoi les constructeurs l'associent à des armatures (d'où le nom de béton « armé ») en acier qui, elles, présentent une très bonne résistance à la traction (environ 300 MPa). Le béton peut être comparé à une éponge constituée d'un squelette solide (minéraux alcalins de pH élevé, de l'ordre de 13) et d'eau circulant dans des pores. Ces conditions chimiques sont très favorables à l'armature en acier. En effet, pour des pH de l'ordre de 13, le fer est dit « passivé » : il ne rouille pas. L'acier est alors recouvert d'une couche protectrice relativement imperméable aux agressions chimiques. Cet état « passif » n'est pas éternel ! Il peut durer plusieurs dizaines d'années tant que le béton n'est pas dégradé. Les choses se compliquent avec le temps, comme on peut le voir dans les films *Planète Terreur*, de Robert Rodriguez (2007), ou *Le Labyrinthe : la terre brûlée*, de Wes Ball (2015), qui multiplient les

▼ Dans de nombreux scénarios de science-fiction décrivant la disparition des humains de la surface du globe, la nature reprend rapidement ses droits. La végétation envahit la ville, symbolisant la fin d'un monde fondé sur l'urbain, comme l'illustre ici le dessinateur malaisien Chan Kai Hong.



images de tours immenses réduites à des carcasses nues, dont l'ossature de ciment, de sable et de gravier se désagrège inexorablement. De fait, ce couple béton et acier se trouve confronté à des composés plus ou moins agressifs : les chlorures, provenant de l'eau de mer (ou des sels de déglçage), mais également le dioxyde de carbone (CO₂) engendrant la carbonatation du béton et son acidification. Lorsque les conditions physico-chimiques sont réunies au niveau des aciers, ils peuvent passer en régime « actif » de corrosion et produire de la rouille. Plus volumineuse que le fer de départ, la rouille ainsi formée est compacte et rigide – elle présente une résistance mécanique de quelques dizaines de mégapascals. Elle remplit d'abord les vides autour de l'armature, puis elle « pousse » sur le béton d'enrobage. Lorsque la pression exercée dépasse la résistance du béton, celui-ci se fissure, éclate et se détache du bâtiment. Si l'épaisseur d'enrobage (de 3 à 5 cm) n'a pas été respectée à la construction, on peut également voir les armatures d'acier apparaître.

LA PIERRE, MATÉRIAU ÉPHÉMÈRE

Si le béton se montre finalement fragile, qu'en est-il des bonnes vieilles pierres qui semblent avoir permis une meilleure conservation des cités pharaoniques englouties par le désert ? Les Égyptiens construisaient en utilisant soit des roches « tendres » (calcaires), soit des roches « dures » silicatées (grès, quartzite, granite...). Auteur du complexe funéraire de Djéser vers - 2600, Imhotep, dont le nom a été rendu célèbre par le film de Stephen Sommers *La Momie* (1999), est crédité de la généralisation de l'utilisation de la pierre comme matériau de construction des

temples et des tombeaux funéraires. La science-fiction n'a pourtant pas hésité à faire subir les pires outrages aux métropoles modernes bâties selon des techniques de construction qui ont fait leurs preuves pendant des millénaires. Ainsi, comme New York dans *A.I. Intelligence Artificielle* (2001), de Steven Spielberg, Paris sera à son tour englouti par la mer – hypothèse que Camille Flammarion avait déjà envisagée dans son essai *La Fin du monde* (1893). Dans

La rouille rongant les bâtiments est la parabole de l'agonie de la civilisation industrielle

la bande dessinée d'Éric Adam, Didier Convard et Han Neck Han, *Panthéon, le tombeau des dieux endormis* (2012), on voit néanmoins que, plusieurs siècles après la montée des eaux provoquée par la fonte des pôles, la plupart des bâtiments de la capitale française émergent toujours des flots. Les visions de cette nouvelle Venise battue par les vagues de l'océan global sont très esthétiques mais, si l'on s'en tient à la physique des matériaux, on peut douter de leur réalisme. En effet, l'un des facteurs prédominants pour la dégradation des ouvrages est la présence de l'eau, qui interagit avec les constituants de la pierre comme les sulfures et les sels solubles, et libère des substances potentiellement agressives. Mais, si la seule exposition à la pluie accélère les phénomènes d'érosion, que dire en cas d'immersion complète ? Certaines roches (grès, argile) et pierres artificielles se dissolvent partiellement (1).

Pire, les cycles de mouillage (ou humidification) et séchage ont des effets particulièrement nocifs, notamment sur les roches argileuses qui se fissurent, entraînant la ruine des ouvrages dont elles sont constituées (2). Il ne faut donc pas se faire d'illusions : ni dans la réalité ni dans la fiction, la célèbre devise de Paris *Fluctuat nec mergitur* (« elle est battue par les flots mais ne coule pas ») ne garantit l'avenir posthume de la Ville Lumière.

Il reste que la science-fiction est, à bien des égards, un sous-produit de la révolution industrielle. Chez Jules Verne, par exemple, le fer et l'électricité sont les piliers du monde futur qui va s'incarner dans la tour Eiffel. Cependant, cette modernité fragile a tendance à rouiller. Les paysages hallucinants de la Rust Belt (la « ceinture de la rouille », en anglais), cette région industrielle du nord-est des États-Unis où, depuis la fin des années 1970, les complexes métallurgiques et sidérurgiques qui avaient fait la force du pays pourrissent lentement, ont d'ailleurs souvent servi de décor à cette évocation d'un futur terriblement présent. C'est bien entendu le cas de la déliquescence de la ville de Détroit imaginée par Paul Verhoeven dans son film *RoboCop* (1987), des vastes neufs industrielles qui apparaissent dans le film *Le Labyrinthe : la terre brûlée* ou dans le jeu vidéo *Fallout 3*, qui se déroule en 2277, après la guerre nucléaire ayant dévasté le monde.

Le phénomène de corrosion est spectaculaire lorsqu'un métal est plongé dans une solution agressive, comme de l'acide concentré. Après un certain temps d'immersion, on observe une ébullition et le métal disparaît. Il s'est dissous dans la solution, qui est devenue plus sombre parce qu'elle a reçu

des ions métalliques en grande quantité. Dans un environnement dit « naturel », le dioxygène (O₂) stimule la réaction de corrosion, mais l'humidité de l'air est encore plus agressive pour l'acier ou le fer. Dans les lieux très secs, comme les déserts, les métaux ne se corrodent presque pas. C'est pourquoi les objets de ce type retrouvés dans les tombes égyptiennes sont remarquablement conservés. En revanche, lorsque l'air est humide, une fine pellicule d'eau recouvre les surfaces métalliques (au-dessus de 60 à 80 % d'humidité relative). L'oxygène contenu dans ce mince film d'eau réagit et accélère la corrosion de l'alliage. Pour la science-fiction, l'évocation de cette rouille rongeur inexorablement les outils de la modernité occidentale est la parabole d'un monde à l'agonie. Autre symbole de la modernité liée à l'industrialisation du monde moderne, la route occupe, elle aussi, une place à part dans les récits d'anticipation. Il s'agit en effet de montrer que ces longs rubans de bitume qui stérilisent les sols ont largement participé à la destruction de la planète. Pourtant, après la chute de l'humanité, la nature semble vite reprendre ses droits, comme le note l'écrivaine française Julia Verlanger

L'enfouissement dans le sable semble la meilleure option pour préserver nos cités déchues

dans son roman *L'Autoroute sauvage* (1976) : « *Le ruban gris à deux voies tranchait dans la végétation. La chaussée luisait d'humidité.*

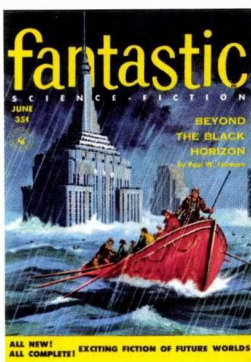
Par-ci, par-là, dans des craquelures, l'herbe s'installait. Un jour ou l'autre l'autoroute serait mangée par la sylvie, comme le reste du réseau routier. »

Cette image, vite devenue un poncif de la science-fiction, n'a rien d'extravagant : les structures routières, intégrant plusieurs couches de matériaux (enrobés bitumineux, graves-ciment et parfois béton), subissent de multiples sollicitations externes dues au trafic des véhicules et aux agressions climatiques (3). Ces sollicitations mécaniques et thermiques, couplées à d'autres phénomènes comme le vieillissement du bitume, la présence d'eau ou de sels de déglacage, sont les principaux responsables de la dégradation des revêtements : déformations (affaissements,

nids-de-poule, ornières), fissurations, arrachements, décollements entre couches et, parfois, apparition de « faïençage », ces craquelures décrites dans *L'Autoroute sauvage*. Le revêtement devient alors perméable aux intempéries et au sol, ce qui favorise le développement de la végétation si la route n'est pas entretenue – ce qui arrivera quand nous aurons disparu.

DES MONDES SUBMERGÉS

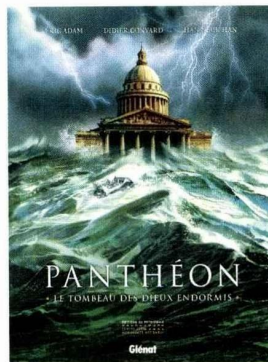
L'hypothèse d'un réchauffement climatique entraînant la désertification d'une bonne partie de la planète a été souvent exploitée par la science-fiction. Les hardis explorateurs de *Salut l'Amérique!* découvrent ainsi une ville de New York abandonnée par ses habitants, écrasée par une chaleur insupportable : « *Déjà ils voyaient les dunes qui meublaient le sol de ces canyons désertés. Les vagues de sable hautes de trois mètres qu'aucune empreinte humaine n'était venue troubler depuis plus d'un siècle.* » Dans le film *Peut-être* (1999), de Cédric Klapisch, c'est Paris qui a subi le même sort – ce qui permet de montrer de très belles vues d'immeubles haussmanniens émergeant de leur gangue dorée. L'écrivain américain Hugh Howey va encore plus loin dans *Outresable* (2019), puisqu'il imagine que la planète entière a été recouverte d'une épaisse couche de grains de quartz, de micas et de feldspaths. Seuls d'audacieux plongeurs osent s'enfoncer dans cette matière molle pour aller chercher les trésors dissimulés dans les immeubles disparus. Il semblerait d'ailleurs que cet enfouissement serait la meilleure solution pour préserver nos villes désertes de l'érosion et de la corruption. La hausse des



▲ Numéro de juin 1955 du magazine américain *Fantastic*.



▲ Roman de J.G. Ballard *Salut l'Amérique!*, 1981.



▲ BD *Panthéon. Le tombeau des dieux endormis*, 2012.

La tour Eiffel, colosse de fer aux pieds d'argile ?

La structure métallique de la tour Eiffel, à Paris, a inspiré les autrices et auteurs de science-fiction, qui ont utilisé les capacités d'oxydation du fer pour illustrer de manière métaphorique la fragilité de nos civilisations. Dans *Bob Morane : les fourmis de l'Ombre Jaune* (1974) du romancier belge Henri Vernes, par exemple, elle pourrit sur pied dans la touffeur d'un climat chaud et humide, qui ronge inexorablement son emblématique squelette de fer. En réalité, la tour Eiffel est protégée de la corrosion par des couches de peinture. En 1900, dans son ouvrage *La Tour de trois cents mètres*, son concepteur écrivait : « On

ne saurait trop se pénétrer du principe que la peinture est l'élément essentiel de la conservation d'un ouvrage métallique et que les soins qui y sont apportés sont la seule garantie de sa durée. »

La Tour a ainsi été repeinte dix-neuf fois depuis sa construction - une fois en moyenne tous les sept ans. Le revêtement présente une couleur semblable au bronze et conçue spécifiquement : le « brun

tour Eiffel ». Fin 2022, cette dernière arborera un « jaune brun », plus doré, afin de célébrer les Jeux olympiques de 2024. Les descriptions de la science-fiction qui nous placent dans un futur lointain où les humains auront disparu n'ont rien d'in vraisemblable, car cette maintenance ne sera plus assurée. Le fer de la Tour subira un processus de corrosion atmosphérique fortement accéléré si l'on dépasse les 60 à 80 % d'humidité relative. Quelques centaines d'années suffiront alors à transformer la sentinelle de Paris en un magma de rouille, qui donnera du fil à retordre aux archéologues du futur ou d'ailleurs.



▲ La Tour est en ruine dans Bob Morane : les fourmis de l'Ombre Jaune (1987), BD d'Henri Vernes et Felicísimo Coria, tirée du roman éponyme.

températures et l'ensablement des ouvrages auraient un effet bénéfique sur leur conservation. La sécheresse ralentirait les phénomènes de dégradation chimique (comme la carbonatation), reliés directement à la quantité d'eau disponible. Ainsi, les pierres calcaires, mais également les pierres artificielles comme les mortiers et les bétons, seraient conservées plus longtemps (4). L'engloutissement par les eaux, comme dans *Waterworld* (1995), de Kevin Reynolds, où l'acteur Kevin Costner se promène dans les rues submergées de Denver (transformée en Danvar par Hugh Howey dans *Outresable*), pourrait être une autre fin qui attend nos cités déchuës. Dans *Homo disparitus*, Alan

Weisman l'avait noté : « *La statue de la Liberté elle-même finira peut-être par sombrer corps et âme, mais sa forme restera intacte indéfiniment, à l'exception de quelques modifications chimiques et d'une possible colonisation par les anatifes* [un crustacé pédonculé qui se fixe sur les rochers, NDLR]. *Du reste, c'est peut-être dans les fonds marins qu'elle sera la plus en sécurité.* » Il convient à cet égard de rappeler que les cités englouties constituent un patrimoine culturel subaquatique protégé par la Convention de l'Unesco de 2001. Sont considérés trois facteurs principaux de dégradation : les conditions environnementales, les micro-organismes et l'impact humain, raison pour laquelle l'accès

du public y est très réglementé. Puisque l'exposition du bois et du marbre à l'eau est susceptible de conduire à leur détérioration, il est même préconisé de les réenfouir ou de les recouvrir pour les préserver (5). Avec la montée inexorable des eaux provoquée par le réchauffement climatique, certaines villes comme Djakarta, Le Caire et Rio de Janeiro risquent, bien malgré elles, d'entrer sur la liste de ces vestiges subaquatiques protégés. ■

(1) C. Alves et al., *Geosciences*, 11, 459, 2021.

(2) K. Elert et al., *Constr. Build. Mater.*, 330, 127226, 2022.

(3) H. Baaj, *Techniques de l'ingénieur*, TRI4620 V1, 2012.

(4) M. Elsalamawy et al., *Alex. Eng. J.*, 58, 1257, 2019.

(5) K. Oikonomopoulou, *The Long-Term Effects of Underwater Archaeological Parks on the Preservation of Underwater Cultural Heritage*, 2018.