Les strates de la ville de l'Anthropocène

Jan Zalasiewicz, Colin Waters et Mark Williams

Dans des millions d'années, certaines des villes construites par notre espèce formeront de gigantesques et spectaculaires fossiles, susceptibles de s'intégrer aux parois d'un futur Grand Canyon ou aux hautes falaises des littoraux rocheux d'un océan encore à naître. D'un point de vue géologique, c'est une prédiction relativement raisonnable, voire prosaïque. Après tout, les villes sont bâties pour l'essentiel à partir de roches reconstituées et celles, comme La Nouvelle-Orléans, Shanghai ou Venise, construites sur des parties subsidentes de l'écorce terrestre seront bientôt enterrées géologiquement et ramenées à la surface seulement dans un avenir lointain, à la suite d'une nouvelle évolution des modèles de mouvement de l'écorce terrestre [1].

Il s'agit là d'une vision purement abstraite, de quelque chose auquel il faut réfléchir à la manière dont on songe à la vie des dinosaures ou à celles des tapis microbiens qui ont colonisé la Terre il y a des milliards d'années. Cette abstraction s'inscrit aussi dans le contexte de l'Anthropocène, le concept qui a émergé au Mexique en 2000 lorsque Paul Crutzen, frustré des discussions relatives à l'impact des activités humaines à l'époque de l'Holocène, avança l'idée que cette dernière était arrivée à son terme et qu'une nouvelle période avait débuté [2]. Mais la véritable

1 - La logique de ce processus est exposée dans Jan Zalasiewicz, *The Earth after Us: What Legacy Will Humans Leave in the Rocks ?*, Oxford, Oxford University Press, 2008.
2 - Une brève histoire du concept d'Anthropocène est proposée dans Will Steffen *et al.*, « The Anthropocene: Conceptual and Historical Perspectives », *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369-1938, 2011, p. 842-867. Les deux articles principaux ayant inauguré ce concept dans son sens moderne sont : Paul

Annales HSS, 72-2, 2017, p. 329-351, 10.1017/S0395264917000567
© Éditions de l'Ehess

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

signification, aujourd'hui, de l'Anthropocène n'est pas seulement de confirmer que les êtres humains laisseront des traces indélébiles, dans les faits, sur la Terre, ou même qu'ils sont en train d'engendrer une transformation fulgurante à l'échelle de la planète. Tous ces éléments sont vrais, mais ce qui importe, c'est que les êtres humains, acteurs de ces changements, sont également rattrapés par ces derniers et doivent vivre avec les conséquences qu'ils entraînent. Le concept d'Anthropocène, en envisageant les actions humaines en termes géologiques, peut nous aider à comprendre et à mieux appréhender la situation. Bien que l'activité actuelle de certains géologues (y compris les auteurs de cet article) consiste à examiner si ce mot peut relever de l'échelle des temps géologique (ce qui constituerait une avancée majeure pour la géologie, dans la mesure où l'échelle des temps officielle est au cœur de cette science et n'est pas quelque chose que l'on peut modifier à la légère)[3], le terme s'est aussi largement diffusé dans les sciences, les arts et les sciences humaines, non pas simplement comme un condensé de l'impact des activités humaines sur la Terre, mais aussi comme un moyen de réexaminer en profondeur les relations entre l'histoire humaine et l'histoire naturelle[4].

Les villes comme un morceau de géologie

Comment pourrait-on, dans ce contexte, considérer les villes comme partie prenante de la géologie ? Le plus simple et peut-être le plus petit élément de réponse est qu'elles sont faites de géologie, minutieusement reconstituées et fabriquées pour former nos hébergements contemporains. Le béton est une combinaison de calcaire, de sable et de gravier, auxquels on ajoute de nos jours des éléments comme les cendres volantes, qui désignent les restes non brûlés de charbon et de pétrole prélevés dans leurs réserves souterraines et consumés dans les centrales électriques. La brique est constituée majoritairement d'argile ou d'argilite, refaçonnée puis quasi instantanément transformée à la température de fusion dans des fours à brique. L'acier est composé principalement de fer, un élément rare à l'état pur dans l'écorce terrestre – bien que le noyau soit formé à 80 % de fer, les météorites ferreuses en sont la source majeure dans la croûte –, que les humains ont séparé et façonné en quantité à l'échelle de la planète. Il y a aussi l'aluminium (un métal pur dont l'extraction des sols tropicaux nécessite d'importantes dépenses d'énergie), le verre (extrait des dépôts de sable) ou encore le plastique (une transformation de l'huile de pétrole), et il ne s'agit là que

J. Crutzen et Eugene F. Stoermer, « The 'Anthropocene' », *Global Change Newsletter*, 41, 2000, p. 17-18 ; Paul J. Crutzen, « Geology of Mankind », *Nature*, 415, 2002, p. 23.

3 - Un résumé récent de ces données se trouve dans Colin N. Waters *et al.*, « The Anthropocene Is Functionally and Stratigraphically Distinct from the Holocene », *Science*, 351-6269, 2016, p. 137.

4 - Dipesh Chakrabarty, « The Climate of History: Four Theses », *Critical Inquiry*, 35, 2009, p. 197-222 ; Bruno Latour, « Anthropology at the Time of the Anthropocene: A Personal View of What Is to Be Studied », Washington, American Association of Anthropologists, 2014, http://www.bruno-latour.fr/sites/default/files/139-AAA-Washington.pdf.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

de quelques matériaux de base. Les composants d'une ville peuvent s'avérer d'une extraordinaire complexité, comme l'illustrent les téléphones mobiles que portent sur eux quasiment tous ses habitants et dont chacun est composé de dizaines de métaux rares.

Il convient de s'interroger un peu plus longuement sur ce qu'il adviendra de ces matériaux à long terme, mais là encore la réponse ne peut être qu'abstraite, fondée sur des réflexions relativement simples dans le domaine de la chimie, formulées à partir de faits géologiques déjà connus. Les composants du béton survivront généralement bien sous terre ; les minéraux produits lors de la polymérisation tels que l'ettringite (un sulfate de calcium et d'aluminium hydraté) et l'hillebrandite (un silicate de calcium hydraté) ne sont pas très courants géologiquement, mais on peut les trouver à l'état naturel là où des magmas de granit sont entrés en contact avec du calcaire. Les constituants de base du béton (sable de quartz et gravier) comptent quant à eux parmi les matériaux les plus durables en géologie. Cependant, dans un environnement d'eaux souterraines légèrement acides, le ciment constituant le béton se dissoudra d'une manière rappelant les grottes creusées dans le calcaire naturel – il existe de nos jours des stalactites et des stalagmites produites de cette façon à partir du béton. Les briques, une fois enterrées dans les futures strates, subiront progressivement un métamorphisme inverse qui les amènera à l'équilibre à des températures plus basses. Puis elles connaîtront un léger mouvement d'expansion lorsqu'elles absorberont de l'eau, selon un processus que les archéologues ont décelé en étudiant les briques romaines, et changeront de couleur, passant du rouge au gris à mesure que les oxydes de fer qu'elles contiennent se réduiront chimiquement. L'acier présent à la surface s'oxydera jusqu'à rouiller, tandis que, sous terre, il se dissoudra probablement, tout comme l'aluminium, faisant place à des creux destinés à être remplis par la suite de nouveaux minéraux ; de nombreux fossiles naturels ont connu des processus similaires. Le verre, quant à lui, se dévitrifiera sans doute, c'est-à-dire qu'il se transformera lentement en une masse de cristaux microscopiques, comme le fait l'obsidienne, son équivalent volcanique naturel, sur une période de plusieurs millions d'années. Le plastique, enfoui toujours plus profondément, se carbonisera et deviendra cassant comme les feuilles fossiles. Se livrer à ce type d'expériences de pensée nous laisse entrevoir ce que sera notre héritage lointain, quand les humains auront disparu depuis bien longtemps et que la Terre sera devenue une planète différente. Mais pour nous être utile aujourd'hui, ce futur doit être rapproché le plus possible de notre présent, tout en s'inscrivant dans une échelle et un cadre géologiques.

Envisageons ensuite la ville non seulement comme un assemblage de roches et de minéraux, de spécimens potentiels destinés à un musée quelconque de notre époque ou de l'avenir lointain, mais aussi comme un système constitué de flux de matière (vivante et non vivante) et d'énergie, émergeant, évoluant et prenant fin dans le temps. Cela nous éloigne un peu de l'idée communément admise de la géologie comme étant la plus matérielle des disciplines. Néanmoins, nous sommes bien plus proches de la réalité de la science, à l'époque actuelle et aussi depuis ses débuts. Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, a écrit en 1778 *Les époques*

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

Illustration 1



Échantillon 12 A", façade et fenêtre, sud
Ministère de l'Économie et des Finances, Bercy, Paris XII, 1980

Ces illustrations d'Anne-Sophie Milon (dont les originaux sont en couleur) s'appuient sur une méthodologie consistant à représenter les matériaux à partir desquels les monuments cités ont été construits, sur la base de sections minces et de fossiles microscopiques, pour donner une idée de la diversité et de la juxtaposition des différents types de roche qui pourraient apparaître et être préservés dans l'avenir lointain. Les catégories et la palette de combinaisons de textures de roches, de minéraux et de fossiles qui résulteront de la fossilisation de certaines parties des villes ne ressembleront à rien de ce qui a pu être observé dans la géologie des milliards d'années d'histoire de la Terre, et toute personne enquêtant dans un avenir lointain sur nos vestiges devra élaborer sa propre méthodologie pour tenter de les interpréter.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

Illustration 2



Échantillon 28, façade et esplanade, nord-ouest
Centre Georges Pompidou, Paris IV, 1977

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

de la nature, probablement la première histoire de la Terre explicitement fondée sur des preuves [5]. Dans cet ouvrage concis et percutant, on saisit concrètement la notion de Terre comme un système en évolution : l'auteur évoque la décomposition du magma solidifié formant de l'argile, l'accumulation d'innombrables générations de coquilles composant du calcaire ou encore l'apparition puis l'extinction de différentes formes de vie liées à l'évolution progressive du climat terrestre. Cette notion intégratrice est à l'évidence toujours présente aujourd'hui dans la science du système-Terre – le milieu disciplinaire, ou plutôt transdisciplinaire, au sein duquel P. Crutzen travaillait lorsqu'il a forgé le concept d'Anthropocène –, mais elle est aussi profondément inscrite au cœur de la géologie classique.

Prenons l'exemple d'un fleuve. Dans une perspective géographique, il s'agit d'un canal transportant de l'eau de la terre à la mer. Du point de vue du géologue, certaines roches, notamment le vieux grès rouge qui illustre particulièrement bien la période du Dévonien en Grande-Bretagne, sont des fragments de fleuves fossilisés. Les grains de sable rouge oxydés constituant aujourd'hui la roche ont été balayés le long des anciens cours d'eau il y a environ 400 millions d'années. Mais, que ce soit à l'époque de Buffon ou à la nôtre, si l'on veut comprendre un tant soit peu ces roches, un examen plus approfondi est nécessaire. Il ne s'agit pas simplement d'identifier tel ou tel genre de roche, provenant d'un fleuve ou au contraire d'un courant d'une ancienne mer, mais plutôt d'interpréter cet ancien fleuve selon une approche aussi holistique que possible, comme un système de transport d'eau et de grains sédimentaires, qui a subi les changements climatiques et géographiques à mesure que la terre s'élevait ou s'abaissait sous l'effet des forces tectoniques, qui a continuellement changé son cours, qui est passé par des périodes de sécheresse et de crue, qui a favorisé différents types de végétation et abrité divers animaux. Ce système n'était pas seulement composé d'un canal mais aussi d'une zone d'inondation qui accumulait de la boue plutôt que du sable, et de boucles de méandres abandonnés qui formaient des lacs temporaires. Avec le temps, il a formé une structure tridimensionnelle construite à partir de sédiments accumulés, présentant des niveaux de complexité imbriqués, du continental au microscopique [6]. En outre, les grains de sable du fleuve ont été arrachés aux montagnes par l'érosion dans leur région d'origine ; ces montagnes peuvent également être reconstituées à partir des indices minéraux présents dans les grains. En effet, la dernière demeure de nombreux grains de sable n'est pas dans les cours d'eau, qui constituent plutôt des conduits pour le transport du sable (un transport de masse naturel comparable aux réseaux routiers ou ferrés), mais à l'intérieur des grands deltas qui s'accumulent là où les fleuves se déversent dans les océans ou les lacs. Le sédiment peut parfois être transporté encore plus loin, pour achever son parcours dans un lac profond ou un fond océanique.

5 - Jacques ROGER (éd.), *Buffon, « Les époques de la nature »*, Paris, Éd. du Muséum, 1962.
6 - Douglas W. JORDAN et Wayne A. PRYOR, « Hierarchical Levels of Heterogeneity in a Mississippi River Meander Belt and Application to Reservoir Systems », *AAPG Bulletin*, 76-10, 1992, p. 1601-1624.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

Une fois enfoui, le système fluvial fossilisé continue d'évoluer. À mesure qu'il est compressé et chauffé, les fluides en sont chassés, y compris les hydrocarbures provenant de la matière organique enterrée. Il peut être froissé ou disloqué par les pressions tectoniques ou cuit par un afflux de magma. S'il est ramené à la surface, il s'érodera et ses composants finiront par constituer une partie des nouveaux systèmes sédimentaires en cours de formation. En tant que système fluvial, il représente simplement une fraction du système-Terre en perpétuelle évolution et sa nature est déterminée par l'état de ce système plus vaste. Au début de l'ère paléozoïque, il y a 500 millions d'années, quand la vie sur Terre était principalement confinée à la mer, les systèmes fluviaux obéissaient à des logiques différentes de celles des fleuves de la période carbonifère à la fin de l'ère paléozoïque, il y a environ 350 millions d'années, et après, quand la Terre a été recouverte de végétation [7].

S'il est possible d'analyser n'importe quelle portion du règne humain de la même façon qu'un système sédimentaire [8], les villes constituent cependant le phénomène qui se prête le plus manifestement à ce genre de réflexion. Elles sont actuellement les endroits où vit la majorité des habitants de la planète – c'est le cas seulement depuis les dernières années ; en 1960, un tiers de la population terrestre, bien moins nombreuse, était urbain [9] – et elles consomment quasiment les trois quarts de la production d'énergie de l'humanité [10]. Elles représentent clairement une part de l'Anthropocène en expansion rapide, dont elles sont en effet la figure emblématique [11]. Cette idée se retrouve un peu dans la notion de métabolisme urbain [12], qui s'intéresse par exemple aux flux de matière et d'énergie entrant dans une ville et aux flux de déchets qui en sortent. Ce type d'analyse a des connotations

7 - Mark Williams *et al.*, « Humans as the Third Evolutionary Stage of Biosphere Engineering of Rivers », *Anthropocene*, 7, 2014, p. 57-63.

8 - Bien entendu, il existe des empires non humains : les systèmes géologiques autour des lacs, des océans, des volcans, des sols ou des récifs coralliens peuvent être analysés sous cet angle, et certains textes importants exposent cette démarche, notamment Harold G. Reading (dir.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*, Hoboken, Wiley-Blackwell, 1996.

9 - Voir les données du Global Health Observatory : http://www.who.int/gho/urban_health/situation_trends/urban_population_growth_text/en/.

10 - Voir le rapport de UN-Habitat : http://unhabitat.org/urban-themes/energy/.

11 - La plupart des articles réputés sur l'Anthropocène recourent abondamment aux images de villes, par exemple Elizabeth Kolbert, « Enter the Anthropocene: Age of Man », *National Geographic*, mars 2011, p. 60-85. Les deux volumes produits jusqu'ici par l'Anthropocene Working Group (Jan Zalasiewicz *et al.* (dir.), « The Anthropocene: A New Epoch of Geological Time ? », *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369-1938, 2011, p. 833-1112 ; Colin N. Waters *et al.*, *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene ?*, Londres, Geological Society of London, 2014) ont également utilisé des images de ville pour leurs couvertures, de jour et de nuit, comme c'est le cas de celle, montrant Shanghai, choisie pour la première analyse stratigraphique de l'Anthropocène (Jan Zalasiewicz *et al.*, « Are We Now Living in the Anthropocene ? », *GSA Today*, 18-2, 2008, p. 4-8).

12 - Différents articles s'appuient sur le métabolisme urbain comme méthode d'analyse, notamment Christopher Kennedy, Stephanie Pincetl et Paul Bunje, « The Study of Urban Metabolism and Its Applications to Urban Planning and Design », *Environmental Pollution*, 159, 2011, p. 1965-1973.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

biologiques explicites ; la ville est considérée comme un organisme vivant, respirant, mobile, qui mange et qui excrète. C'est, incontestablement, une métaphore utile, et peut-être même plus, pour les urbanistes. Mais elle fonctionne avant tout selon une échelle de temps qui correspond approximativement au présent géologique. Il en existe néanmoins une autre, liée à une idée de processus différente, située entre l'échelle métabolique et l'échelle abstraite, entre les perspectives de passé profond et d'avenir lointain que nous avons proposées au début de cet article. Combiner ces deux approches – la géologie s'est toujours offert le luxe de s'étendre à n'importe quel intervalle de temps – reviendrait à envisager la ville comme un système sédimentaire.

Selon cette perspective, les composants de la ville, principalement des roches d'une sorte ou d'une autre ou bien leurs dérivés, sont apportés de leurs régions d'origine et amassés sur le site urbain. Dans les systèmes fluviaux, le transport et le déplacement du matériau selon la pente sont rendus possibles par la gravité, depuis les montagnes jusqu'au littoral, et la nature du matériau transféré reflète la nature spécifique des processus de transport. Le sable circule le long des cours d'eau, avec les cailloux, les galets et même les rochers déplacés lors des inondations, tandis que la plupart des sédiments, en particulier les plus fins, passent simplement à travers, transportés en suspension par l'eau du fleuve vers la mer ; une partie d'entre eux seulement restent coincés dans la plaine d'inondation ou dans les étangs et les lacs temporaires apparus à la suite de crues. Ainsi, la formation des strates répond à un modèle et à une logique reflétant la dynamique du système fluvial, qui dépend notamment de la végétation poussant autour du fleuve, et la nature du matériau fourni, qui dépend en retour de la géologie et de l'activité tectonique des montagnes en érosion. En fonction des strates qui en résultent, un géologue pourrait déterminer la direction d'où provient le sédiment, une part de la composition de la roche ainsi que la dynamique des montagnes en érosion dans l'arrière-pays.

La logique de construction d'un système urbain est différente. Les matériaux sont sélectionnés par un sous-ensemble d'habitants humains en raison de leurs diverses qualités en matière d'utilité et d'esthétique parmi les corps sédimentaires et rocheux situés dans des directions et à des distances variées de la ville elle-même. Les parcours de déplacement peuvent être courts, en général seulement une dizaine de kilomètres pour les matériaux de base tels que le sable et le gravier, ou extraordinairement longs, dans le cas de composants plus chers, comme les pierres décoratives de revêtement des immeubles, ceux-ci pouvant se trouver dans d'autres pays, voire sur d'autres continents. Certaines villes doivent leur emplacement à la présence de ces matériaux de construction, qui coïncide avec celle d'hydrocarbures ayant permis le développement précoce de la révolution industrielle à la fin du XVIII^e^ et au début du XIX^e^ siècle au Nord et dans le Centre de l'Angleterre ; à cette époque, les voies de communication étaient encore rudimentaires et les coûts élevés, ce qui incitait à une utilisation ingénieuse des ressources locales. De nos jours, la gravité joue un petit rôle, voire aucun, dans la détermination de la direction du déplacement. Le transport suit en effet une pente allant des zones d'offre

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

Illustration 3



44 avenue de Flandres
Riquet, Paris XVIII, 1910

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

aux zones de demande et s'effectue *via* l'application dirigée de l'énergie tirée essentiellement de la combustion d'hydrocarbures liquides. Les composants d'un système sédimentaire urbain peuvent par conséquent être conduits du bas vers le haut[13]. Parmi ceux-ci, seuls quelques-uns passent au travers, au début du moins ; la plupart s'accumulent (sont « accrétés verticalement », selon le terme employé par un géologue), formant ce que l'on pourrait appeler une strate urbaine[14], tandis que d'autres se ramifient vers le bas, dans le sol, à mesure que les fondations et la sous-structure de la ville envahissent le domaine souterrain.

Le système fluvial n'est bien entendu pas la seule analogie possible. Dans les déserts arides, c'est le vent qui constitue en partie l'énergie mécanique motrice nécessaire au transport des sédiments ; sa force et sa direction indiquent à leur tour la position géographique au regard des régions climatiques. Sur un terrain glaciaire, le transport longue distance de roches, notamment les roches décoratives dures comme les granits, s'effectue par les glaciers ou, en mer, par les icebergs à la dérive ; la direction du transport illustre respectivement la gravité et la carte des courants océaniques. Néanmoins, dans tous ces cas, il existe des modèles reflétant la nature des forces physiques à la surface de la Terre et qui sont donc plus ou moins prévisibles, même à partir des indices dispersés et fragmentaires produits par les strates fossilisées. Cette relation n'existe pas dans le cas des strates urbaines, et encore moins des sédiments anthropogéniques. La dispersion de matériaux d'origine humaine dans les fonds océaniques est un bon exemple, qu'il s'agisse du mâchefer (résidu provenant de la combustion de la houille), jeté délibérément à la mer depuis les bateaux à vapeur, ou des détritus provenant des épaves. Les bateaux sont l'équivalent des icebergs dispersant des sédiments, mais les convois empruntent des routes commerciales maritimes plutôt que les courants océaniques.

La chimie des villes

Une autre caractéristique des structures des villes les distingue des types de roche courants : leur chimie. Pour toute strate naturelle, il est généralement simple de déterminer la composition chimique : aussi bien ses composants majeurs, comme le silicone, l'aluminium, le fer et le magnésium, que ses oligo-éléments, comme le zirconium, l'yttrium, le cérium, le néodyme, et même des éléments mesurés habituellement en partie par milliard comme l'iridium. La technique est simple : un échantillon représentatif est prélevé – de quelques dizaines de grammes à quelques kilos selon que la roche est plus ou moins grossière – puis écrasé et mélangé. Un sous-échantillon est ensuite étudié avec des moyens d'analyse modernes, par exemple un matériel de fluorescence X. Plusieurs milliers de roches ont désormais été analysées de cette façon, si bien que l'on peut faire des estimations

13 - Ces idées sont développées de manière approfondie et rigoureuse dans Peter K. Haff, « Technology and Human Purpose: The Problem of Solids Transport on the Earth's Surface », *Earth System Dynamics*, 3-2, 2012, p. 417-431.
14 - Au sens utilisé par J. Zalasiewicz, *The Earth after Us*…, *op. cit.*

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

correctes, autant d'un point de vue spécifique, concernant ces échantillons de roche individuels, que général – des estimations de la composition chimique du schiste moyen en Amérique du Nord ainsi que de la croûte continentale et de la croûte océanique, entre autres.

Pour une strate urbaine, ce type d'analyse est bien plus difficile à effectuer et risque fort, en pratique, de manquer totalement de précision. Les villes sont en effet beaucoup trop hétérogènes et construites de manière trop complexe pour permettre une étude directe ou calculer une moyenne chimique. Un bâtiment moderne individuel est constitué d'un assemblage de béton, de brique, de plâtre, de céramique, de bois, de plastique, de mortier et de verre, traversé par une grande variété de fils et de tuyaux (cuivre, acier, aluminium, fibre de verre), avant même d'y ajouter des meubles, des tapis, des papiers peints, des ustensiles de cuisine, de l'équipement électronique, des livres, des disques et diverses décorations. Afin d'obtenir ne serait-ce qu'une estimation approximative de la composition chimique représentative (l'une des mesures de base en géologie) d'une strate urbaine – une construction produite par l'activité consciente des humains et, par conséquent, intuitivement sous le contrôle et la surveillance de ces derniers –, il serait peut-être plus judicieux d'essayer d'estimer les proportions relatives de flux entrants des divers matériaux et objets, d'évaluer leur composition chimique et ainsi de tenter de parvenir à intégrer les données obtenues. Cependant, cette procédure serait extrêmement laborieuse et ne garantirait pas d'obtenir une estimation raisonnable et représentative. Il existe néanmoins des composants pour lesquels une telle analyse pourrait s'avérer un peu plus simple, ce qui mène au problème des frontières disciplinaires classiques dans l'Anthropocène ; bien plus mouvantes, ces démarcations sont moins claires qu'elles ne l'étaient lors de l'Holocène. La structure fonctionnelle d'une ville n'a pas été considérée, jusqu'ici, comme faisant partie de la géologie, bien qu'une grande part de celle-ci provienne de la roche et soit destinée à y retourner. Ce qui est relatif à la forme d'une ville est le domaine des urbanistes, des ingénieurs, des architectes, des constructeurs et, bien sûr, de ses habitants. Les bâtiments les plus vieux et les vestiges les plus anciens, cependant, deviennent en général des objets d'étude pour les historiens et les archéologues, et c'est ce territoire qui commence, une fois de plus, à chevaucher celui du géologue.

Les géologues travaillant dans des zones urbaines peuvent reconnaître et cartographier des types spécifiques de strates formées par les ruines des anciens bâtiments, démolies et écrasées puis mélangées au sol et au sous-sol, creusées puis transportées au cours du processus de construction, de réparation et de rénovation d'une ville. Ces strates, parfois globalement qualifiées de « terrain artificiel », pourraient être des masses substantielles de gravats et de terres accumulés, dont l'un des exemples les plus frappants est le Teufelsberg, la colline la plus élevée de Berlin, longue d'un kilomètre et haute de 80 mètres, constituée de 75 millions de mètres cubes de décombres datant de l'après-guerre [15]. Ou bien elles pourraient

15 - Hans-Jürgen MIELKE, *Wald und Politik. Die unendliche Geschichte des Berliner Teufelsberges*, Berlin, Projekte-Verlag Cornelius, 2011.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

se composer d'éléments négatifs : de trous dans le sol essentiellement, comme des carrières ou des puits de mine abandonnés ou toujours en activité, ou encore de formes souterraines plus complexes comme des tunnels et des égouts [16]. Il peut également arriver que ces trous dans le sol soient remplis plus ou moins rapidement par d'autres matériaux, tels que les gravats de bâtiments et les déchets ménagers dans les décharges. Dans la mesure où le transport de grandes quantités de déchets demande beaucoup d'énergie, les décharges sont situées, pour des raisons économiques, à proximité des villes. Celles-ci évoluent donc aussi avec le temps d'une manière comparable aux attitudes sociétales. En tant qu'individus, nous sommes passés d'une situation d'autosuffisance, fondée sur le mantra « faire durer et raccommoder », à une société de consommation caractérisée par l'obsolescence programmée de nos marchandises. On peut alors avancer l'idée que nos villes sont passées de conurbations durables, construites pour l'essentiel à partir de matériaux d'origine locale, à des développements éphémères, modifiés en permanence pour satisfaire les demandes changeantes et utilisant les ressources les moins onéreuses parmi les produits de construction de la planète [17]. Si éphémères que soient ces développements, leurs effets agiront et se feront sentir longtemps, notamment au cours de notre échelle de temps qualifiée d'« intermédiaire », qui pourrait concerner des dizaines voire des centaines de générations humaines – en supposant, bien entendu, que celles-ci ne soient pas interrompues.

Ces dépôts anthropogéniques ont été détectés et cartographiés par les géologues en tant que strates distinctes depuis qu'Eduard Suess les a identifiés et délimités à Vienne à la fin du XIX^e^ siècle [18]. Ils figurent désormais communément sur les cartes géologiques actuelles des zones urbaines du monde entier et comptent parmi leurs éléments les plus importants [19]. Ces strates sont complexes, aussi bien d'un point de vue géométrique qu'au niveau de leur texture et de leur composition (et, pour des raisons économiques pratiques, de leurs propriétés techniques), mais elles sont malgré tout bien plus simples que les structures urbaines fonctionnelles enracinées en elles, car elles constituent la majorité des restes écrasés et homogénéisés des générations plus anciennes de bâtiments. Une analyse chimique représentative de certains fragments de ces matériaux pourrait même être tentée. Ce « terrain artificiel » est aussi un objet d'étude pour les

16 - Jan ZALASIEWICZ, Colin N. WATERS et Mark WILLIAMS, « Human Bioturbation, and the Subterranean Landscape of the Anthropocene », *Anthropocene*, 6, 2014, p. 3-9.

17 - Les structures modernes ne semblent absolument pas plus durables que les anciens bâtiments, comme l'indiquent les descriptions saisissantes de la décomposition rapide des tours d'habitation abandonnées dans Alan WEISMAN, *The World without Us*, Londres, Virgin Books, 2008.

18 - Eduard SUESS, *Der Boden der Stadt Wien : nach seiner Bildungsweise, Beschaffenheit und seinen Beziehungen zum Bürgerlichen Leben. Eine geologische Studie*, Vienne, Wilhelm Braumüller, 1862 ; *Id.*, *Der Boden der Stadt Wien und sein Relief. Geschichte der Stadt Wien*, Vienne, Adolf Holzhausen, 1897.

19 - J. R. FORD *et al.*, « An Assessment of Lithostratigraphy for Anthropogenic Deposits », *in* C. N. WATERS *et al.*, *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene ?*, *op. cit.*, p. 55-89.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

archéologues ; ils ont l'habitude d'en examiner minutieusement certains aspects et établissent des stratigraphies internes complexes qui fournissent des indications sur les générations humaines précédentes [20].

Ainsi, la substance matérielle du paysage urbain est constituée à la fois de parties fonctionnelles, dans lesquelles nous vivons et qui ont été formées principalement de roches apportées depuis l'extérieur de la zone urbaine, et de déchets solides sur lesquels il est bâti, ceux-ci servant également de fondation. Une visite sommaire de n'importe quelle ville montre bien qu'il s'agit d'un système dynamique, associant la construction, la destruction et la réparation de sa structure – le transport des composants, pour lequel a été établie une analogie avec le système sédimentaire – ainsi que le flux entrant « métabolique » et le flux sortant de matière et d'énergie qui lui permet – de même qu'à ses habitants – de rester fonctionnel. Pour être compris correctement, il doit donc être considéré comme un tout, indépendamment des frontières disciplinaires qui ont jusqu'ici compartimenté les parties fonctionnelles et les parties abandonnées des villes, objets d'analyse distincte par différentes communautés de chercheurs.

Certains de ces aspects pourraient être approfondis. Ce système sédimentaire est extraordinairement dynamique en ce qui concerne le transport et le dépôt de matériaux géologiques, sédiments et roches. L'une des caractéristiques de l'Anthropocène est l'accélération des processus d'érosion et de dépôt sédimentaire sur le paysage à la suite de l'action humaine ; des estimations suggèrent une augmentation de l'ordre de grandeur par rapport aux niveaux de fond sur le temps long [21], les villes devenant l'épicentre de cette activité humaine. Les rythmes de base à long terme sont des moyennes, il ne faut pas l'oublier, et certains systèmes sédimentaires se caractérisent par des taux de transport et de dépôt de sédiments plus importants que d'autres. Cependant, la comparaison doit être établie avec des systèmes fondés sur des rythmes élevés d'accumulation de sédiments, tels que les grands deltas et les volcans en activité, au sein desquels une quantité suffisante peut s'empiler pour abaisser localement l'écorce terrestre. La masse des villes pourrait-elle, par analogie, être à même de produire une telle déformation de la croûte au cours des siècles et des millénaires à venir ?

Cette question n'est pas complètement abstraite, dans la mesure où de nombreuses villes sont situées au niveau ou juste au-dessus du niveau de la mer, qui est en train de monter ; il convient donc de prendre en compte tous les facteurs ayant des incidences sur leur position actuellement précaire, entre la terre et la mer. D'un point de vue scientifique, il ne s'agit pas non

20 - Cela est discuté en détail par Matt EDGEWORTH, « The Relationship between Archaeological Stratigraphy and Artificial Ground and Its Significance », *in* C. N. WATERS *et al.*, *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene?*, *op. cit.*, p. 91-108, qui a plaidé en faveur de l'utilisation du terme « archéosphère » pour définir ce type de terrain, l'opposant à ce que les archéologues appellent « le naturel », à savoir les strates géologiques intactes qui se trouvent en dessous.

21 - Roger LeB. HOOKE et José F. MARTÍN-DUCQUE, « Land Transformation by Humans: A Review », *GSA Today*, 22-12, 2012, p. 4-10.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

plus d'une question dénuée d'intérêt. Certains composants sont plus ou moins simples et « classiques », selon la flexibilité ou la rigidité d'une partie de la croûte terrestre, qui ne présente pas les mêmes propriétés selon les endroits. Les géophysiciens, cependant, ont mis au point des moyens de déterminer ce paramètre dans des limites raisonnables. L'aspect davantage « Anthropocène » du sujet est en revanche plus complexe. Quel est le poids d'une ville ? Un peu comme le problème soulevé par la composition chimique, cela laisse entrevoir de larges zones d'ignorance fondamentales et collectives concernant ce que l'on peut considérer comme les constructions les plus importantes jamais réalisées sur cette planète. Néanmoins, la question de savoir si les villes sont suffisamment lourdes pour faire s'abaisser la croûte terrestre semble plus facile à traiter, du moins jusqu'à un certain point.

Il convient pour cela de considérer les parties à la fois fonctionnelles et abandonnées d'une ville (le terrain artificiel ou archéosphère). La première est la plus difficile à évaluer. Combien pèse un gratte-ciel et est-il comparable à celui d'à côté, construit dix ans plus tôt à partir d'une combinaison différente de matériaux ? Qu'en est-il d'une maison urbaine, d'une habitation collective ou d'un opéra ? Des estimations sont possibles, en s'appuyant sur les modèles numériques détaillés d'élévation des villes fournis par le satellite laser LIDAR, qui donnent des indications quant au volume de l'environnement construit ainsi que des chiffres généraux relatifs à la masse des différents types de construction. Mais il faudra se livrer à une analyse lente et exigeante pour parvenir à des estimations raisonnables. Les systèmes géologiques naturels, qu'ils soient anciens ou actuels, sont de ce point de vue plus faciles à analyser. À certains égards aussi, les composants « déchets » dans le « terrain artificiel », ou archéosphère, d'une ville sont plus aisés à estimer que ceux de la structure fonctionnelle ; cela suppose une étude des archives des milliers de puits de forage disponibles pour de nombreuses villes, habituellement consignées dans les enquêtes géologiques publiques. Cette analyse visant à établir la géométrie et la composition, et donc la masse de « terrain artificiel », s'avère laborieuse mais assez simple, bien que même un nombre élevé de puits de forage ne permette pas de saisir l'entière complexité de ces nouvelles strates anthropiques [22].

D'autres aspects sont à prendre en compte. Quelle distance a parcouru le matériau constitutif de la structure de la ville ? S'il provient d'un lieu relativement proche, il n'a pas bougé du tout du point de vue de l'écorce terrestre, mais seulement changé de forme, et il n'aura donc qu'un effet négligeable sur l'affaissement de la croûte. S'il vient globalement de plus loin, en particulier au-delà de la « longueur de

22 - Si l'on simplifie à l'extrême et qu'on les combine avec d'autres séries de données mondiales, on peut obtenir une estimation approximative de la masse totale des zones urbaines de la Terre, en ce qui concerne aussi bien les matériaux fonctionnels que les déchets ; selon des estimations, il s'agirait d'environ 11 000 milliards de tonnes sur la masse totale de la « technosphère physique » de la Terre de 30 000 milliards de tonnes. Voir Jan ZALASIEWICZ *et al.*, « Scale and Diversity of the Physical Technosphere: A Geological Perspective », *The Anthropocene Review*, 4-1, 2017. Ce chiffre implique que les matériaux de nos villes, répartis de manière égale sur l'ensemble de la surface de la Terre (terres et océans réunis), pèsent plus de quinze kilos par mètres carrés.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

flexion » de l'écorce terrestre, il peut avoir un effet significatif. Ces calculs ne sont pas simples et rassembler les données requises peut impliquer à la fois une mesure précise de ce qui constitue actuellement une ville et l'analyse d'archives historiques susceptibles de révéler la provenance du matériau et de définir l'échelle temporelle du processus. Ce genre de problème reflète le type de combinaisons disciplinaires nécessaires pour saisir l'ampleur du changement que représente l'Anthropocène. C'est l'une des questions fondamentales, mais toutes ne sont pas nécessairement les plus importantes pour le présent. S'il s'agit de prédire à quelle échéance une ville côtière donnée risque d'être submergée par l'élévation du niveau de la mer, d'un point de vue pratique, d'autres facteurs sont pour l'heure plus importants. Il y a naturellement la vitesse de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale elle-même, de l'ordre de plus de trois millimètres par an [23] et qui tend vers une accélération globale quasi certaine. Il y a aussi une subsidence, certes plus superficielle, mais qui s'étend généralement à une échelle plus large, provoquée par l'extraction de nappes souterraines et d'hydrocarbures des strates de boue épaisse disposées sous les villes construites au-dessus de deltas ; cette subsidence, en tout état de cause irréversible, peut s'étendre sur une échelle de plusieurs mètres [24]. Les fluides retirés du sous-sol enlèvent une partie de la masse présente sous la ville et cette tendance contrecarre l'augmentation du poids des bâtiments et des matériaux. Il se peut que l'Anthropocène relève de la géologie à grande échelle, mais ce n'est pas si simple que ça.

Le sentier des déchets et les gigantesques poubelles

Penchons-nous à présent sur une autre question. Où vont les parties de la ville une fois qu'elles ont été abandonnées ? Celle-ci pourrait se poser dans les cas courants de rénovation et de renouvellement des bâtiments, lorsqu'ils n'ont plus d'utilité. Autrefois, cela était souvent assez facile, car les édifices démolis, partiellement en temps de paix ou en masse en temps de guerre ou en cas de catastrophe naturelle, étaient simplement rasés sur place, éventuellement recouverts d'une couche de charbon de bois signalant la conflagration. Les débris pouvaient constituer les fondations de nouvelles constructions composées de matériaux neufs issus de roches apportées de l'extérieur, comme dans l'exemple des niveaux superposés des restes de la ville antique de Troie. Une analogie s'établit ainsi avec les systèmes géologiques dans lesquels les sédiments s'empilent par accrétion verticale, comme ceux qui se trouvent dans les zones centrales des lacs.

Les modèles de transport de masse ont évolué au cours du temps. De nos jours, le béton issu des bâtiments démolis et dont on se débarrasse peut être encore simplement écrasé sur place, ou emmené vers des décharges pour

23 - Carling C. Hay *et al.*, « Probabilistic Reanalysis of Twentieth-Century Sea-Level Rise », *Nature*, 517, 2015, p. 481-484.
24 - Voir par exemple James P. M. Syvitski *et al.*, « Sinking Deltas Due to Human Activities », *Nature Geoscience*, 2, 2009, p. 681-686.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

former des accumulations localisées – à la manière dont les débris des attaques du 11 septembre 2001 ont été déplacés et entassés pour constituer l'une des dernières couches de la décharge de Fresh Kills à Staten Island, dans la banlieue de New York. Dans les pays dont les législations incitent au recyclage plutôt qu'au simple dépôt de ce genre de matériaux, le béton est broyé et généralement réutilisé pour les corps de chaussées, au sein des villes et le long des chemins serpentant à travers la campagne. Le mouvement du matériau s'apparente ici au processus sédimentaire appelé « canal de progradation » ; on l'observe par exemple là où les effluents des deltas dominés par un fleuve comme le Mississippi avancent vers l'extérieur, comme une ligne de bancs de sable en expansion se déplaçant progressivement de l'embouchure vers la mer. Cette redistribution de roches et de sédiments urbains est littéralement en train de créer les fondations que les générations futures coloniseront.

En un sens, c'est ce qui s'est passé pendant la plus grande partie de l'Holocène, dans la mesure où les villes telles qu'on les définit habituellement ont existé pendant environ six millénaires. Mais, comme c'est le cas de la majorité des activités humaines au cours de cette période, les premiers centres étaient relativement disparates, petits et à croissance lente ; ils variaient en fonction du temps et de l'espace et se distinguaient par leurs propres modèles et textures (leurs styles architecturaux, en terminologie non géologique) développés localement. La transition vers l'Anthropocène, si l'on considère que cette période s'est ouverte au milieu du XX^e^ siècle avec la « grande accélération » du nombre d'humains, de l'énergie, des usages, de l'industrialisation et de la mondialisation, a suivi une trajectoire différente [25]. Les villes se sont multipliées et ont connu une expansion puissante, avec l'essor des mégapoles, désignant celles comptant plus de dix millions d'habitants. En 1950, New York est devenue la première mégapole, inaugurant peut-être le début de l'Anthropocène. Suivant une croissance constante, il y avait en 2015 trente-cinq mégapoles ; ce phénomène s'observe sur tous les continents, à l'exception de l'Australasie et de l'Antarctique [26].

Les villes de l'Anthropocène se distinguent donc de leurs ancêtres de l'époque de l'Holocène, mais pas uniquement par la taille. En termes géologiques, elles présentent une lithologie et une texture différentes. Le béton, une sorte de roche anthropogénique utilisée occasionnellement depuis les temps de la Rome antique, est devenu le matériau de construction principal à l'époque de l'Anthropocène (encore non officielle), avec une abondante production d'environ 500 milliards de tonnes à ce jour depuis la Seconde Guerre mondiale (l'équivalent d'à peu près un kilogramme pour chaque mètre carré de la surface de la planète, terre et mer réunies). D'autres composants habituels des villes utilisés depuis cette époque contiennent de l'aluminium et du plastique ; ces matériaux, pour la

25 - On peut comparer les graphiques, revus et mis à jour, de Will STEFFEN *et al.*, « The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration », *The Anthropocene Review*, 2-1, 2015, p. 81-98, avec les modèles des tendances stratigraphiques de l'Anthropocène de C. N. WATERS *et al.*, « The Anthropocene Is Functionally… », art. cit.

26 - Thomas BRINKHOFF, « Major Agglomerations of the World », 2017, http://www.citypopulation.de/cities.html.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

plupart façonnés à partir des innombrables types d'artéfacts de l'après-Seconde Guerre mondiale (des « technofossiles [27] » en termes géologiques), signifient que les strates de la ville de l'Anthropocène peuvent être aisément distinguées de celles de l'Holocène les ayant précédées [28]. Les villes de l'Anthropocène se ressemblent toutes à travers le monde, dans la mesure où les styles architecturaux modernes se sont répandus par le biais de la mondialisation, tandis que les secteurs datant d'avant-guerre conservent leurs styles et leurs modèles locaux, qui reflètent les traditions anciennes et les pierres de construction de leurs contrées d'origine. La transition évolutive, combinée à la nature agressive et envahissante du paradigme architectural moderne, a été frappante ; elle s'est répandue rapidement à l'échelle du globe, de manière similaire à l'expansion accélérée de certaines espèces biologiques les plus spectaculairement invasives transplantées par les humains.

Les termes « technofossile » et « invasif » employés ici signifient que les villes de l'Anthropocène peuvent être envisagées à travers un autre prisme, qui relève toujours du domaine géologique mais qui appartient à la discipline de la paléontologie plutôt qu'à celle de la sédimentologie. Bien entendu, les villes sont constituées de roches, et le flux de particules de roches qui les pénètre et les traverse peut être comparé aux systèmes sédimentaires déterminés physiquement tels que les systèmes fluviaux. Mais elles sont également construites par des organismes biologiques, les humains, et peuvent à ce titre être considérées comme des phénomènes paléontologiques ou, pour être plus précis, comme des objets susceptibles de se fossiliser à l'avenir. Cette sorte de souplesse temporelle dans le jeu avec les phénomènes actuels, afin qu'ils puissent être comparés avec ceux du passé lointain et en même temps projetés dans un futur éloigné, est une habitude tenace (certains diraient peut-être un défaut de caractère) des géologues ; l'excuse communément avancée pour une telle attitude cavalière envers la quatrième dimension est que cela contribue à fournir un contexte et une compréhension.

L'analogue direct de ces technofossiles ne se présente pas sous la forme de restes des organismes eux-mêmes, tels que des os ou des coquilles (dénommés fossiles corporels), mais plutôt d'ichnofossiles, ces structures dans les sédiments ou la roche laissées par les activités des organismes. Parmi elles, on compte celles liées à la locomotion et à l'alimentation, notamment les terriers de vers et les empreintes de dinosaures, ainsi que des structures de domicile plus élaborées, comme des nids fossilisés de guêpes solitaires et de termites [29], que l'on peut raisonnablement comparer à des pavillons et à des gratte-ciel [30]. La différence, bien entendu, réside

27 - Jan ZALASIEWICZ *et al.*, « The Technofossil Record of Humans », *The Anthropocene Review*, 1-1, 2014, p. 34-43.

28 - Même si des villes plus anciennes, telles que Paris et Londres, sont constituées en grande partie d'un filigrane entremêlé de composants de l'Holocène et de composants de l'Anthropocène, ces derniers sont souvent faciles à différencier au vu de leurs matériaux et artéfacts distincts.

29 - Emese M. BORDY *et al.*, « Advanced Early Jurassic Termite *(Insecta: Isoptera)* Nests: Evidence From the Clarens Formation in the Tuli Basin, Southern Africa », *Palaios*, 19-1, 2004, p. 68-78.

30 - Avec une excellente climatisation, du moins dans les structures construites par les termites.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

dans l'échelle de construction des parties au-dessus du sol des villes, atteignant des centaines de mètres de hauteur, et des parties souterraines, qui parviennent à des profondeurs plus importantes encore, si l'on prend en compte les trous de forage qui les approvisionnent en eau et en hydrocarbures, les mines qui les alimentent en minéraux et en charbon, ainsi que l'extrême complexité des réseaux transportant l'eau, les déchets, l'électricité et les gens, sous forme de systèmes de métros ou autres tunnels.

Il n'y a rien de véritablement nouveau dans le fait de considérer les villes comme des systèmes à la fois physiques et biologiques. Les récifs coralliens sont aussi, simultanément, des phénomènes biologiques extraordinaires et des constructions massives de calcaire avec une fine peau vivante. De même, plus généralement, la couche moyenne de boue au fond de la mer, destinée à devenir une strate de schiste argileux, est le lieu d'accueil de toutes sortes d'organismes fouisseurs et rampants, dont les traces entremêlées détermineront la texture et les structures internes de la couche de schiste. Un prisme plus innovant à travers lequel analyser les villes se trouve au carrefour entre l'analogie physique (les villes en tant que lithosphère) et l'analogie biologique (les villes en tant que biosphère) ; il permet de cerner des nœuds depuis l'intérieur de la technosphère, un concept élaboré par Peter Haff[31]. Cette émanation de la biosphère est entrée dans l'usage, non pas tant parce qu'elle est une addition d'objets technologiques – qui ne représentent qu'une portion de la technosphère –, mais parce qu'elle est un *système* émergent qui comprend à la fois ces outils et ces machines et les humains qui les ont fabriqués, ainsi que les structures économiques et sociales qui ont rendu possible leur construction. La technosphère a sa dynamique interne et ses propres besoins, et les humains doivent répondre à ces derniers pour préserver le système qui les (c'est-à-dire qui nous) maintient en vie dans les quantités actuellement présentes sur la planète. Cela met à mal la pensée d'une maîtrise totale de la technosphère, donc de l'évolution des villes, par les humains, et met en évidence l'idée selon laquelle des systèmes émergents de ce type sont mus par leur propre dynamique, elle-même émergente et dépendante de la trajectoire historique empruntée par ces structures au cours de leur développement.

La technosphère évolue extrêmement rapidement, du moins du point de vue de la création et de la diversification des espèces. La biosphère se développe vite aussi, mais dans le sens d'une perturbation et d'un changement dans l'assemblage des espèces, au sein duquel la disparition de l'une d'entre elles est un signal important. C'est pourquoi l'on peut dire que la technosphère, avec ses villes en plein essor, parasite la biosphère plutôt qu'elle ne vit en harmonie avec elle. P. Haff a observé que l'une des différences entre la biosphère (une composante du système-Terre depuis environ quatre milliards d'années) et la technosphère (un phénomène qui n'a atteint un niveau significatif d'intégration mondiale qu'au cours des derniers

31 - Peter K. HAFF, « Technology as a Geological Phenomenon: Implications for Human Well-Being », *in* C. N. WATERS *et al.*, *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene?*, *op. cit.*, p. 301-309.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

siècles) est que la première est particulièrement efficace pour recycler la matière et l'énergie, contrairement à la seconde qui s'est avérée jusqu'ici manifestement médiocre dans ce domaine – ce facteur, remarquait-il, pourrait finir par entraver son développement ultérieur.

De nombreux déchets plus visibles de la technosphère de la ville sont collectés quotidiennement afin de remplir les trous dans le sol provoqués par l'extraction du matériau de base utilisé pour construire la structure de la ville elle-même. Ces décharges, où les déchets peuvent atteindre des épaisseurs de dizaines de mètres et s'étendre sur des zones de plusieurs kilomètres carrés, se composent de strates géologiques tout aussi extraordinaires que celles des routes et des bâtiments, bien que moins souvent évoquées dans la bonne société. Il y a quelques années, leur composition, du moins en termes de proportions relatives des objets habituels formant ces strates, a été analysée dans une étude passionnante qui a donné lieu à un livre à la fois stimulant intellectuellement et divertissant[32]. Un protocole complexe a été élaboré afin de classer les différents restes de nourriture, les vêtements usés, les plastiques, les matériaux de construction, les outils abandonnés, les couches usagées, les vieux journaux et magazines et bien d'autres choses encore qui constituent les ordures ménagères. Les strates plus anciennes et plus récentes au sein des détritus pouvaient être facilement identifiées par les divers types d'artéfacts, ou technofossiles, dont certains portaient des timbres de datation facilitant la tâche, même si des analyses chimiques représentatives n'ont pas été, pour autant qu'on le sache, entreprises.

Quel que soit l'intérêt porté par la conscience publique à ces sites et aux objets qu'ils contiennent, on s'attend probablement à ce que cette matière se décompose et se transforme avec le temps en une sorte de matériau naturel, tel un compost de jardin. Il se peut que cela ait été le cas de certaines anciennes décharges, à l'époque de l'Holocène, non recouvertes et donc perméables aux mouvements des eaux souterraines, et dans lesquelles la matière organique molle, au moins, pouvait se décomposer. Cependant, cette stratégie de « dilution et dispersion » avait pour conséquence de déplacer les substances contaminantes dans les eaux souterraines, ce qui risquait de polluer les réserves en eau des zones urbaines ayant produit initialement les déchets. Les centres d'enfouissement techniques actuels sont imperméables aux eaux souterraines (qui ne peuvent donc pas être polluées par eux) grâce à des feuilles de plastique séparant les couches de déchets, eux-mêmes généralement contenus dans des sacs plastiques. William Rathje a observé que ce matériau jeté dans les décharges ne se décompose pas dans ce genre d'environnement ; au contraire, il se momifie, puis est amené à se fossiliser dans un avenir lointain. S'il reste enterré, une bonne partie restera identifiable pendant une très longue période.

32 - William RATHJE et Cullen MURPHY, *Rubbish ! The Archaeology of Garbage*, Tucson, The University of Arizona Press, 2001.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

L'avenir géologique des villes

Un aspect semble ne pas avoir été particulièrement pris en compte. Le matériau des décharges se transformera au cours des périodes géologiques en gigantesques tas d'ordures fossilisés, objet d'une véritable fascination pour tous les paléontologues de l'avenir lointain susceptibles de les étudier. Mais que se passerait-il si ce matériau ne demeurait *pas* enterré ? Cette question s'inscrit dans une interrogation plus large. Qu'adviendra-t-il des villes, abandonnées après une quelconque catastrophe humaine par exemple, si elles ne sont pas enfouies au sein des sédiments et transformées en futures strates ? Ici, à nouveau, notre échelle de temps « intermédiaire » entre en jeu.

D'un point de vue géologique, une seule chose *ne peut pas* se produire : la stase, c'est-à-dire le fait, pour une ville, de rester telle qu'elle est, sans connaître d'évolution. À long terme, une ville sera soit enterrée, soit érodée, et son destin dépendra du fait que la croûte sur laquelle elle se situe s'élève, favorisant l'érosion, ou s'affaisse, favorisant l'enfouissement. Si une ville s'est entièrement érodée, on en conclut en général qu'elle va juste disparaître, un peu comme dans la vision de l'empire matériel d'Ozymandias, le roi autrefois puissant du poème de Percy Bysshe Shelley, tombant en ruines dans les sables du désert. Géologiquement, la situation est un peu plus complexe. Lorsqu'elles ont subi l'érosion, une ville ou ses décharges ne disparaissent pas plus qu'un massif montagneux abîmé par le vent et la pluie au cours de plusieurs millions d'années. Ce dernier se décompose simplement en cailloux, en sable et en boue qui, à la fin de leurs trajets, s'intègrent aux nouvelles strates se formant dans un lit de rivière, un lac, un littoral ou encore un grand fond marin. Les géologues sont devenus experts dans l'art de reconstituer les caractéristiques des anciens massifs montagneux à partir de leurs particules disséminées dans les générations successives de roches. Ils parviennent même à déduire leur âge à partir de cristaux de zircon contenant de l'uranium ayant subi l'érosion des montagnes et transportés par le vent et l'eau dans les dépôts plus récents ; cet exercice particulier est devenu une sorte d'industrie mineure dans le domaine de la géologie. De la même façon, une ville qui subit l'érosion libérera des particules de roches et de minéraux anthropiques, dont la plupart sont très caractéristiques, sans équivalent précis dans les archives géologiques. Le béton actuel, renforcé avec des particules de cendres volantes provenant des centrales électriques, est un type de roche extrêmement particulier lorsqu'on l'analyse au microscope. La ville et les décharges disparaîtront, mais les sédiments « dopés » avec des particules de roches et de minéraux nouveaux, enrichis en métaux – car les humains ont, de manière sélective, érodé en grande quantité des minéraux métalliques provenant de la Terre pour les utiliser dans leurs constructions – et en d'autres substances, se répandront pendant de nombreux millénaires et formeront les nouvelles strates de l'Anthropocène, sur une zone bien plus vaste que celle des villes qui seront fossilisées plus ou moins sur place [33]. Ce processus s'ajoutera

33 - Ces villes fossilisées se composeront en grande partie de fondations, de sous-sols, de réseaux de métros, d'empilements, etc., et peut-être des étages inférieurs dans certains

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

et s'intégrera pleinement à la préservation des villes humaines dans un avenir lointain. Mais il n'est pas entièrement abstrait, car ses premières étapes sont en cours et constituent déjà certains des défis auxquels l'humanité, à présent et pour les générations à venir, doit faire face à l'époque de l'Anthropocène.

Des exemples frappants peuvent être observés sur le pittoresque littoral rocheux de l'estuaire de Bilbao dans l'Est de l'Espagne, le long des plages de Tunelboca et de Gorrondatxe. En dessous des falaises, des strates rocheuses épaisses de plusieurs mètres apparaissent. Elles correspondent aux anciennes plages qui ont commencé à se former au milieu du XX^e^ siècle, se sont cimentées naturellement et rapidement en raison de leur teneur élevée en calcaire et subissent à présent de nouveau l'érosion. Les particules de sable et de gravier, que l'on a longtemps crues d'origine volcanique, sont maintenant connues pour être essentiellement des restes de scories provenant des fonderies de fer locales qui furent jetées à la mer. De nombreux fragments de brique et de verre, ainsi que des morceaux de plastique, sont aussi incrustés dans les roches : c'est un exemple saisissant de roche anthropocénique [34], naturelle mais principalement constituée de déchets urbains. Il s'agit donc d'une fascinante géologie moderne, mais qui est aussi porteuse d'un message plus sérieux et peut-être même dérangeant.

Penchons-nous sur ces plastiques, qui attirent l'attention même s'ils constituent des ajouts inoffensifs aux grès des plages de Tunelboca et de Gorrondatxe – tant qu'ils restent dans la roche, bien entendu. Ils représentent l'une des nouveautés minérales caractéristiques de l'Anthropocène ; leur production est passée de niveaux négligeables à l'échelle mondiale dans les années 1940 à environ 300 millions de tonnes par an actuellement – une quantité chaque année à peu près équivalente à la masse totale des humains sur la planète. Les particularités mêmes qui rendent le plastique si utile – sa légèreté et sa résistance à la décomposition – signifient qu'il parcourt d'une manière extrêmement efficace le cycle sédimentaire et finit dans la mer. Des fragments plastiques marins, aussi bien grands (macroplastiques) que petits (microplastiques), sont en ce moment transportés à travers la planète par les courants océaniques et finissent sous forme de particules sédimentaires caractéristiques, d'origine humaine (comme des indices géologiques de l'Anthropocène), dans les strates marines, depuis les plages jusqu'aux grands fonds des océans [35]. Une fois qu'ils se trouvent à l'intérieur des strates et qu'ils sont enterrés, hors de portée des organismes, ils deviennent abstraits ; à peine un indicateur utile dans la stratigraphie de l'Anthropocène.

cas. La plus grande part de la superstructure sera en ruine, à l'exception de rares cas où elle sera enfouie sous un brusque et écrasant afflux de sédiments, comme le fut Pompéi sous la cendre volcanique aux temps romains.

34 - María Jesús IRABIEN *et al.*, « Chemostratigraphic and Lithostratigraphic Signatures of the Anthropocene in Estuarine Areas From the Eastern Cantabrian Coast (N. Spain) », *Quaternary International*, 364, 2015, p. 196-205.

35 - Jan ZALASIEWICZ *et al.*, « The Geological Cycle of Plastics and Their Use as a Stratigraphic Indicator of the Anthropocene », *Anthropocene*, 13, 2016, p. 4-17.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

Les véritables conséquences proviennent des dégâts qu'ils occasionnent sur leur trajet [36], et c'est là que l'érosion des structures urbaines peut jouer un rôle de plus en plus significatif.

La quantité de plastique dans les océans à l'heure actuelle est, selon certaines évaluations, énorme. Une étude récente a estimé à environ cinq billions le nombre de morceaux de plastique, ce qui correspond à un poids de 250 000 tonnes flottant sur les océans à tout moment [37] ; une quantité immense, pourtant éclipsée par les 4,8 à 12,7 millions de tonnes déversées dans la mer chaque année. Et même ce chiffre ne représente qu'un faible pourcentage des 300 millions de tonnes produites chaque année, dont la plupart finissent dans les décharges. On s'attend à ce que la masse de plastique rejetée dans la mer soit multipliée par dix au cours des dix prochaines années [38], ce qui est principalement le résultat d'un accroissement de la production et d'une mauvaise gestion des déchets de surface. Mais la quantité finissant dans les décharges est encore plus élevée et augmentera certainement aussi, et même les décharges très bien gérées n'échapperont pas à ces tendances géologiques de longue durée. Quelle proportion sera enterrée définitivement, pour devenir un repère abstrait de l'humanité dans le futur lointain ? Et quelle proportion subira l'érosion, lâchant ainsi une fois de plus la bombe à retardement des déchets, tels le plastique et bien d'autres, dans le cycle géologique actif ou, pour le dire plus simplement, dans l'environnement ?

Il faut s'accorder sur ce que l'on entend ici par « long terme ». Ce processus se poursuivra pendant des millénaires, voire des millions d'années. Il n'en est qu'à ses débuts et il est d'ores et déjà actif. Une étude récente a mis en évidence, pour les seules Angleterre et Écosse, plus de mille décharges côtières présentant un risque d'érosion, à mesure que l'élévation du niveau de la mer les place à portée de l'action des vagues [39]. Les préoccupations actuelles se concentrent principalement sur la répartition possible des substances chimiques toxiques enfouies, mais c'est en fait le contenu entier des décharges qui reprendra son parcours à l'intérieur du cycle géologique une fois qu'il aura été exposé à la surface. Concernant les plastiques impliqués dans ces nouveaux trajets potentiels, quelles sortes de question poserait un géologue dans le cadre de son analyse ? L'une d'entre elles pourrait être : dans quel état seront les plastiques dix ans, un siècle ou un millénaire, ou même

36 - Parmi de nombreux exemples, voir Murray R. Gregory, « Environmental Implications of Plastic Debris in Marine Settings: Entanglement, Ingestion, Smothering, Hanger-On, Hitch-Hiking and Alien Invasions », *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364-1526, 2009, p. 2013-2025.

37 - Marcus Eriksen *et al.*, « Plastic Pollution in the World's Oceans: More Than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing Over 250 000 Tons Afloat at Sea », *Plos One*, 9-12, 2014, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913.

38 - Jenna R. Jambeck *et al.*, « Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean », *Science*, 347-62223, 2015, p. 768-771.

39 - Voir l'étude récente « Assessing the Risk of Pollution from Historic Coastal Landfills », Londres, Queen Mary University of London, 2017, http://www.qmul.ac.uk/media/news/items/hss/176675.html ; Kate L. Spencer et Francis T. O'Shea, « The Hidden Threat of Historic Landfills on Eroding and Low-Lying Coasts », *Ecsa Bulletin*, 63, 2014, p. 16-17.

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press

un million d'années, après avoir été enterrés ? Il existe aujourd'hui des dizaines de types de plastique ; il y aura donc probablement des dizaines de réponses différentes. S'ils sont modifiés par leur séjour sous terre, quelles sont les incidences sur leur interaction avec les forces physiques du vent et de l'eau, et sur leurs effets sur les organismes vivants ?

Si nous voulons comprendre en détail la trajectoire future de l'Anthropocène, de la même façon que nous essayons de connaître l'histoire géologique passée de la Terre, c'est ce genre de science hybride qui devra émerger, une science dans laquelle les disciplines se rencontrent grâce à des ponts placés à des endroits improbables et inattendus. Les villes présentes sur la Terre, caractérisées par une croissance active, sont peut-être l'aspect le plus frappant des évolutions rapides de la géologie terrestre. Leur avenir est souvent envisagé en fonction des cycles d'élection politique ou d'investissement financier. De manière beaucoup plus rare, elles sont analysées au regard d'échelles de temps géologiques de millions d'années. Toutefois, il existe une échelle de temps à cheval entre les deux, située un peu au-delà de l'histoire et pas vraiment traditionnelle d'un point de vue géologique, qui peut s'avérer pratique et utile. Peut-être devrions-nous réfléchir au prochain millénaire, siècle après siècle, comme si nous étudiions un fleuve sur le point de modifier son cours.

Jan Zalasiewicz
Département de Géologie, Université de Leicester, LE1 7RH

Colin Waters
Département de Géologie, Université de Leicester, LE1 7RH,
British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, NG12 5GG

Mark Williams
Département de Géologie, Université de Leicester, LE1 7RH

Illustrations d'Anne-Sophie Milon

Traduction de Florian Berthé

https://doi.org/10.1017/S0395264917000567 Published online by Cambridge University Press