



**LATENT IMPACTS
CATASTROPHES
IN SLOW MOTION**

**IMPACTS LATENTS
CATASTROPHES
AU RALENTI**

JEAN-MARC CHOMAZ

The work of the artists duo HeHe, which involves novel ways of drawing attention to man-made clouds, recalls the wider concern there is about the extent and legitimacy of human activities that impact on the whole ecosystem of the Earth. The current state of that ecosystem results from around four billion years of co-evolution for thousands of species. The term co-evolution is important here, because Darwin's idea of the natural selection of species according to their survival performances should be seen not as a competition between species or individuals, but as a process whereby species optimise their potential together. In such a system with continuous exchanges of information between species and individuals all being gifted with some form of memory, empathy is no more a moral attitude but the results of maximizing your own interest in the long run. Evolution is a game in which the dominant strategy of the living is cooperative and where all species evolve together, exploring multiple, symbiotic solutions.

Interdependence rules, as is evident on the macroscopic level by the well-known role played by bees (and insects more generally) in plant pollination. Even man is not an individual defined by his genome alone, but by a society of cells most of which are of non human origin, each carrying out complementary functions. The current state of Earth's ecosystem results from man's actions as well as from the actions of each living species or their ancestors. It is a system on the move, whose engine still drives the co-evolution in which man is but one of the parts.

Finding out whether (and if such is the case when) our species broke its implicit contract with Earth's ecosystem is a matter of morals. Scientifically speaking, it is an ill posed question, because from a mathematical standpoint Earth's ecosystem belongs to a class of system out of equilibrium, perpetually evolving and mutating as it renews itself.

Several impacts of our species' actions are discussed below, with an emphasis on the non-linear and often chaotic dynamics of such complex coupled systems which are out of equilibrium. Their fluctuating nature, as well as the latency between cause and effect, make it particularly difficult to analyse these impacts, to anticipate their actual intensity and lethal potentials, and finally to assess the extent to which they endanger the survival of humankind.

European national parks permit traditional agriculture within their perimeters, a continuation of the way human activity has been shaping the territory over the course of the centuries. In contrast, the great parks of the American West offer primordial landscapes. The Indian pre-Columbian people (at times nomadic) who once lived there were keen on leaving few traces. Their tendency to leave no mark on the ground and to follow a fugitive path on primitive lands inspires a sense of wonder and liberation in the European collective imagination. Today's sedentary but quick-paced urban civilisation shapes the territory in ever more intrusive ways. The countryside is criss-crossed with roads and highways that connect new urban landscapes whose spectacular skylines pose a challenge to the divine.

In the middle of the 19th century, the disappearance of the Madagascar dodo shocked the world, even though it had occurred a century earlier. Reports following the excavation of a dodo skeleton convinced the populace that the bird's existence was not a myth. Lewis Carroll popularized the dodo in his book *Alice in Wonderland* and soon afterward, the clumsy, trusting bird became an emblem for ecology: an ephemeral phoenix.

For the first time man became aware that he could be responsible for the disappearance of a species because of his predatory practices. Such a disappearance came all the more as a surprise because

Le travail du duo d'artistes HeHe qui met en scène des nuages faits par l'homme renvoie à un questionnement plus grand, celui de l'impact de l'activité humaine sur l'ensemble de l'écosystème appelé planète Terre. L'état actuel de cet écosystème est le résultat de quatre milliards d'années de co-évolution de millions d'espèces. J'insiste sur ce concept de co-évolution car l'idée darwiniste de sélection naturelle des espèces en fonction de leur performance de survie doit être vue, à mon sens, non pas comme une compétition entre espèces ou individus, mais comme une optimisation multicritère et un jeu où la stratégie dominante du vivant est coopérative et où l'ensemble des espèces évolue en même temps, explorant de multiples solutions, toutes symbiotiques. L'interdépendance est la règle, le rôle des abeilles (et plus généralement des insectes) dans la fécondation des plantes en constitue un exemple macroscopique bien connu. Ainsi même l'homme n'est pas un individu défini seulement par son génome mais une société de cellules dont la majorité ne sont pas humaines, chacun effectuant des fonctions complémentaires. L'état actuel de l'écosystème Terre résulte de l'action de l'homme comme de chacune des espèces vivantes actuelles et de leurs ancêtres. C'est un système en mouvement dont le moteur continue à être la co-évolution dont l'homme est un des acteurs. Savoir si – et si oui, quand – notre espèce a rompu son contrat implicite avec l'écosystème Terre est une question de morale. Elle est scientifiquement mal posée au sens mathématique car par construction l'écosystème Terre est un système hors-équilibre en perpétuelle mutation et renouvellement. Différents impacts des actions de notre espèce sont discutés dans la suite de ce texte en insistant sur la dynamique de ces systèmes couplés complexes qui souvent est intrinsèquement chaotique et non linéaire. Leur variabilité et la latence entre cause et effet rendent particulièrement difficile l'analyse de ces impacts, la prévision de leur intensité effective et de leur potentiel létal, la mise en danger de la survie de l'espèce humaine qu'ils représentent.

Les parcs nationaux européens autorisent l'agriculture traditionnelle sur leur domaine, l'activité humaine ayant au cours des siècles façonné le territoire. Les grands parcs de l'Ouest américain offrent eux des paysages primordiaux. Les peuples indiens pré-colombiens, souvent nomades, qui peuplaient ces contrées, tenaient à ne laisser que peu d'empreintes. Leur ligne de vie qui ne marque pas la terre, qui suit une piste fugace sur des terres primitives, fascine par le sentiment de liberté ou même de libération qu'elle induit dans notre imaginaire européen. Aujourd'hui, notre civilisation de sédentaires citadins adeptes de fast moving façonne encore plus le territoire. La campagne est quadrillée de voies rapides connectant de nouveaux paysages urbains dont les magnifiques skylines défient le divin.

Au milieu du XIX^{ème} siècle, la disparition du Dodo de Madagascar, pourtant survenue un siècle plus tôt, a frappé l'imaginaire collectif. Beaucoup pensait que l'animal était une légende mais la découverte des premiers os et les rapports consécutifs le réintégra dans la réalité. Lewis Carroll le popularisa dans *Alice au pays des merveilles* et cet oiseau confiant et lourd devint un symbole pour l'écologie : un phénix éphémère.

L'homme prenait pour la première fois conscience qu'il pouvait provoquer la disparition d'une espèce par sa prédation. Cette disparition surprit d'autant plus qu'elle allait contre l'intuition de la proportionnalité des effets à leurs causes qui voudrait simplement que la population diminue en fonction de l'intensité de la chasse sans jamais tomber à zéro, surtout pour une population si nombreuse. C'était en fait la manifestation de ce qui sera connu ensuite comme la théorie des catastrophes qui décrit l'existence finie des états de proportionnalité entre cause et effet avec possibilité de changement brutal et irréversible vers un autre état qui, dans ce cas, était l'extinction.

it went against the intuitive notion that an animal population simply thins out as a function of the intensity of hunting without ever vanishing altogether, especially when the population is so numerous. This new awareness was actually a precursor of what would come to be known as catastrophe theory, a theory that describes the finite existence of proportional conditions between cause and effect, and includes the possibility of brutal, irreversible change from one state into another state which, in this case, was extinction.

Below a threshold amount of population, the cessation of hunting is no longer enough to stop the extinction process, the reproduction rate having become less than the natural death rate. Such irreversible threshold effects between two different dynamic regions are now typical in the overall dynamics of populations and epidemics. Since the dodo, other species have disappeared according to the same catastrophe phenomenon mathematically called fold - or multi-stability.

More recently, collective awareness of the human impact on flora has emerged; however, it is less strongly felt because it is less obvious to most people. Vegetal species are far more numerous and often less known or not known at all. The term 'biodiversity' which was coined to describe this phenomenon, introduced the idea of a 'soft average' made up of all living beings collectively and therefore are no longer considered individually (like the dodo). While this concept allows people to visualise the treasures of billions of years of life's buoyant creativity and to communicate about them, its effect in a general sense lessens in their minds the irreversible tragedy of the disappearance of each species.

These three impacts mentioned above are visible in landscapes and flora/fauna populations. Their effects are easily observed and their intensification marks the entry into the new geological age shaped by man: the Anthropocene. This geological era of humanity, described by Chemistry Nobel Prize Paul Crutzen in his book, *Geology of Mankind*, deals first with invisible impacts that are not observable, for they affect continuous fields and not discrete entities that influence the quality of air, water, or soil. They cannot be easily predicted because they occur quickly in terms of the geological time scale and cannot be readily differentiated from the natural variability of such fields within one era.

Man's influence on the atmosphere starts with the industrial age as the dodo starts disappearing. Man-made clouds appear in the sky, coming out of the chimneys of manufacturing plants and urban centres (these Man made Clouds are what give HeHe's work its texture). Until the 1950s, these clouds had a positive connotation: they stood for progress and civilisation. The smog in London and in other great industrial cities was a symbol of economic health. It was particularly dense and frequent because unlike fog and smoke that dissipate naturally in clean air, pollutants generate fog by providing the hydrophilic particles onto which humidity may condense to form fog. Once formed, smog blocks sun rays before they can illuminate daytime and heat the ground, thus keeping in stasis a layer of cold air that prevents the fog from eventually rising. This is yet another catastrophe due to the ongoing loop of a double retroaction. Thus deindustrialization in London not only reduced pollution, but also the frequency and density of fog which no longer suddenly descends as portrayed in Uderzo and Goscinny's famous comic book.

Since the 1960s, man-made clouds have taken other forms, more insidious because they are often invisible and less localized, both scarier and less palpable. Technological progress domesticated the cold and brought it into our kitchens, thanks to new coolants invented by the chemical industry: the chlorofluorocarbons (CFC). Emissions of chlorofluorocarbons (CFC) are completely invisible,

Au dessous d'une population seuil, l'arrêt de la chasse ne suffit plus à enrayer l'extinction, le taux de reproduction devenant plus faible que la mortalité naturelle. Ces effets de seuil irréversible entre deux régions dynamiques différentes sont aujourd'hui bien connus dans la dynamique des populations et des épidémies. Depuis, d'autres espèces ont disparu par le même phénomène de catastrophe mathématiquement appelé « repli » (*fold*) ou multi-stabilité.

La prise de conscience collective de l'impact de l'homme sur la flore est plus récent et moins prégnant car moins visible, les espèces végétales étant bien plus nombreuses et souvent peu ou pas connues. Le vocable « biodiversité » est apparu pour décrire ce phénomène, introduisant ainsi l'idée d'une sorte de « moyenne molle » de l'ensemble de ces êtres vivants qui ne sont plus considérés individuellement comme le Dodo mais collectivement comme un ensemble. Si ce concept permet de visualiser et de communiquer sur le trésor de millions d'années de créativité effervescente du vivant, il en atténue, par cet effet de moyenne, le drame irréversible de chaque disparition d'espèce.

Ces trois impacts sur le paysage, la faune et la flore sont visibles et dénombrables, leur intensification marque l'entrée dans le nouvel âge géologique façonné par l'homme, l'Anthropocène. Cette ère géologique de l'humanité, cette *Geology of Mankind* du prix Nobel de chimie Paul Crutzen, correspond en premier lieu à des impacts invisibles, indénombrables, car affectant des champs continus liés à l'air, l'eau ou la qualité des sols, difficilement prévisibles car infiniment rapides par rapport aux temps géologiques et difficilement différenciables de la variabilité naturelle de ces champs dans une même ère.

L'impact de l'homme sur l'atmosphère commence avec l'âge industriel en même temps que le Dodo disparaît. Il se matérialise d'abord par des nuages faits par l'homme, émis par les cheminées de ses industries et de ses concentrations urbaines, les *Man made Cloud* qui texturent l'œuvre du duo HeHe. Jusque dans les années cinquante, ils eurent une charge affective positive, ils représentaient le progrès et la civilisation. Le *Smog* londonien et des grandes cités industrielles était symbole de santé économique. Il était particulièrement dense et fréquent car les brouillards et les fumées ne font pas que s'additionner, la pollution engendrant elle-même le brouillard en fournissant les particules hydrophiles sur lesquelles se condense l'humidité. Une fois formé, ce *Smog* renvoie les rayons du soleil avant qu'ils n'éclaircissent nos journées et chauffent le sol, maintenant ainsi statique la couche d'air froid qui, en retour, empêche le brouillard de se lever. C'est là encore une « catastrophe » due à la boucle imparable d'une double rétroaction. La désindustrialisation de Londres a ainsi, non seulement réduit la pollution, mais aussi la fréquence et l'intensité du brouillard qui ne tombe plus comme dans la célèbre bande dessinée d'Uderzo et Goscinny.

Depuis les années soixante, les nuages créés par l'homme ont pris d'autres formes plus insidieuses car souvent invisibles et globalisées, à la fois plus effrayantes et moins palpables. Le progrès technologique a domestiqué le froid pour l'apporter dans nos cuisines, grâce à de nouveaux fluides caloporteurs inventés par l'industrie chimique, les chlorofluorocarbures (CFC). Nos émissions de chlorofluorocarbures (CFC) parfaitement invisibles, en particulier de nos appareils ménagers usagés, sont transportées par les mouvements complexes de l'atmosphère. Elles se sont mélangées tout d'abord aux basses couches de l'atmosphère, sans que personne n'y prête attention, puis, au bout d'une vingtaine d'années, leur nuage invisible s'est épaissi, jusqu'à s'étendre à la stratosphère. Et une fois que le nuage de CFC a atteint la stratosphère, son temps de résidence se compte en dizaines d'années puisque la stratosphère est protégée du mélange vertical par des effets de stratification, la densité de l'air décroissant fortement avec la hauteur.

particularly in old domestic appliances. They were then redistributed in the complex movements of the atmosphere. They mixed first with the lower layers of the atmosphere without anyone noticing. After twenty years or so, an invisible CFC cloud thickened enough to reach the stratosphere. Once settled in the stratosphere, the cloud remained for decades because the stratosphere is protected from vertical mixing by stratification effects, as air density quickly decreases with height.

Something unexpected then happened. A hole appeared in the ozone¹ permanent stratospheric layer. This is a crucial protective layer that has the capacity to stop UV rays from the sun. Without this natural barrier the rays would burn up all vegetation on earth just as it burns our skin in the summer. Proving the anthropic origin of the ozone hole is extremely intricate. Indeed, to measure the stratospheric ozone layer required dedicated satellites to observe invisible wavelengths in the atmosphere, such as ultra-violets (UV). With such a procedure the ozone cloud is seen as opaque and the hole as transparent. Not only was it necessary to measure the invisible clouds of this constituent, but also to observe the ozone layer long enough to demonstrate that destruction was not due to the natural variability of this cloud.

Once the observations were validated and the implication of man demonstrated, scientists produced by chance or by intuition ozone images generated from the satellite data in bright saturated colour. The hole appeared in the images as a spoilsport in black or navy blue against the background of a planet swathed in warm shades of red and yellow ozone-replete zones. Only then was awareness in the scientific and political communities and in society at large great enough to make this issue a worldwide concern. The use of the word 'hole' instead of the more scientifically correct 'depletion' has been key to reaching a larger public. The work of the scientific community combining a variety of disciplines such as chemistry and physics led to the Montreal protocol, which was signed in 1987. Since 2010 the production of CFC has been stopped. It will take more than sixty years for the hole to disappear in the ozone layer. But right now, the hole keeps growing, fuelled by the emissions of the 1980s, in tandem with the stubborn laws of physics and time frames that cannot take account of human impatience.

This example of the ozone hole is relatively simple. One main pollutant, CFC, spreads slowly into the atmosphere. When it reaches the stratosphere's permanent ozone cloud, (transparent in the visible spectrum, but opaque in ultra-violet frequencies) nothing seems to happen except in the winter polar vortex, where temperature conditions foster the reaction between the chlorine in CFC and ozone, destroying the latter in the process. This demonstrates an invisible global pollution whose effect is located in the summer polar stratospheric vortex, as a result of complex chemical processes which have only recently been elucidated.

In the polar vortex a process called filamentation occurs. It requires some knowledge of fluid mechanics to understand filamentation. Vortices are made of rotating air patches that in the absence of friction behave like so many gyroscopes. They keep spinning while being carried away by their own motion. This property, described by Lord Kelvin, explains that vortices should both generate the flow of fluids and be carried by it. It is the same property that insures smoke remains trapped in the twirling created by a smoker's breath much as dust remains at the heart of a tornado. Through self-rotation, vortices erect a dynamic barrier against the dispersion of what lies at their centres. In contrast to this, the fluid caught between several vortices is alternately drawn by the motion of each and undergoes successive stretching and folding the way chocolate does when being incorporated into a mousse. This mechanism of successive stretching and retraction is called Lagrangian chaos².

Un phénomène inattendu s'est alors produit. Un trou dans le nuage permanent d'ozone¹, est apparu, hors ce nuage d'ozone stratosphérique est précieux car il a la propriété d'arrêter les rayons UV qui, sans cette barrière naturelle brûleraient toute végétation sur terre comme il brûle en été notre peau. Faire la preuve de l'impact de notre activité sur la création du trou dans la couche d'ozone a pris plusieurs décennies à la communauté scientifique. La mesure de l'ozone stratosphérique nécessite en effet des satellites dédiés, observant l'atmosphère dans des longueurs d'ondes non visibles, l'ultra-violet, où le nuage d'ozone est opaque et où le trou devient alors apparent. Il fallait non seulement mesurer les nuages invisibles de ce constituant, mais observer suffisamment longtemps pour pouvoir faire la preuve que sa destruction n'était pas le fait de la variabilité naturelle de ce nuage, toujours très grande pour les phénomènes climatiques. Une fois les observations validées et l'implication de l'homme prouvée, il a fallu rendre son existence tangible par l'utilisation d'images de l'ozone en fausse couleur du canal UV des données satellitaires pour déclencher une prise de conscience scientifique, sociétale et politique suffisante. Le trou apparaissait alors comme trouble-fête bleu marine ou noir sur une planète habillée des couleurs chaudes rouge et jaune des zones riches en ozone. Ce travail de toute une communauté scientifique pluridisciplinaire de chimistes et de physiciens a conduit au protocole de Montréal signé en 1987 et depuis 2010 la production de CFC est arrêtée. Mais il faudra encore attendre plus de soixante ans pour que le trou du nuage d'ozone ne disparaisse. Il continue à augmenter actuellement, car cette catastrophe se poursuit, alimentée par nos émissions des années quatre-vingt, avec l'obstination des lois physiques inéluctables et des échelles de temps surpassant l'impatience humaine.

L'exemple du trou d'ozone est relativement simple, un polluant principal, le CFC, se répand lentement dans toute l'atmosphère. Lorsqu'il atteint le nuage permanent d'ozone de la stratosphère, transparent dans le visible mais opaque dans l'ultra-violet, rien ne se passe en apparence... sauf dans le tourbillon polaire d'hiver, où les conditions de température entraînent la réaction entre le chlore des CFC et l'ozone, détruisant ce dernier. Il illustre une pollution invisible globale dont l'effet se localise dans le tourbillon stratosphérique polaire d'été par un mécanisme chimique complexe élucidé récemment. Ce trou dans le nuage stratosphérique d'ozone n'est pas strictement piégé dans le tourbillon polaire et des filaments, des lambeaux de trou, s'en échappent. Pour comprendre la filamentation un peu de connaissance en mécanique des fluides est nécessaire. Considérons un tourbillon, celui-ci est formé d'un ensemble de parcelles d'air en rotation sur elles-mêmes qui, en l'absence de frottement, se comportent comme autant de gyroscopes. Elles continuent donc à tourner sur elles-mêmes en étant transportées par le mouvement. Cette propriété décrite par Lord Kelvin fait que les tourbillons à la fois engendrent l'écoulement du fluide et sont transportés par celui-ci. Ainsi la fumée reste-t-elle piégée dans l'anneau tourbillonnaire créé par le souffle d'un fumeur comme la poussière reste dans le cœur d'une tornade. Les tourbillons, par leur autorotation, opposent une barrière dynamique à la dispersion de leur cœur. Au contraire le fluide pris entre plusieurs tourbillons est alternativement entraîné par le mouvement de l'un puis de l'autre et subit étirements et replis successifs à la manière du chocolat que le tour de main incorpore à la mousse. Ce mécanisme d'étirements et replis successifs est appelé chaos Lagrangien². Instable, le tourbillon stratosphérique polaire se compose de plusieurs cœurs tourbillonnaires dont le ballet propulse par ce mécanisme de chaos Lagrangien, des lambeaux de trou d'ozone vers les latitudes moyennes. Lorsque ces zones dépourvues d'ozone atteignent nos latitudes ils laissent plantes, bêtes et hommes sans la protection millénaire du nuage d'ozone stratosphérique.

An unstable stratospheric vortex is made of several cores whose choreography propels pieces of ozone hole towards mid latitudes through the mechanism of Lagrangian chaos. As these ozone-deprived areas move around the Earth, they leave plants, animals and man without the age-old protection of a stratospheric ozone cloud.

The problem of climatic change, usually called global warming, is far less easily described because of the multiple physical processes involved that affect not only the atmosphere and the ocean, but also clouds and fog, the biosphere and the cryosphere. The invisibility of pollutants, for instance of gases with greenhouse effects such as CO₂ or sulphur or nitrogen oxides, the massive variations in climate from one year to another, as well as the retroactions, unknown or little known, between a large number of variables (field of temperature, of pressure, of speed, of density, of clouds, vegetal coverage, snow, ice-bank, etc.) and the latency between effects and causes, all make it difficult to put climatic changes into relief, into comprehensive words or images.

Climate is the result of two main factors: radiative forcing and heat transport effects (either vertically via convection or horizontally). Radiative forcing is a complex process. Each layer in the atmosphere or the ocean can absorb, reflect or transmit the radiation coming from the sun, the earth or another layer. For example, the denser the clouds, the more intense their direct reflection of sun rays. The clouds reflect differently not only according to how thick they are but also how large the water drops or ice fragments they contain. Thus the light allowed to pass through the cloud is more or less intense. The heaviness of the cloud varies with promises of rain. A layer's reflexivity can be measured with the albedo, or the ratio between the fraction of reflected light compared to incident light. A cloud's albedo depends not only on the quantity of water vapour it contains, but also on the size of drops and even on their arrangement in space. Similarly, ground covered with snow or an ocean covered with ice may have very strong albedo deflecting sun rays back into space.

The example of contrails (plane condensation trails) well illustrates the complexity of both the formation and the impact of clouds. Commercial jets cruise between 10000 and 12000 metres high, just below the stratosphere, and their engines' combustion creates CO₂, water vapour and sulphur oxides as well as nitrogen pollutants. Depending on the quality of the air around them, jet planes leave a visible trail or one that becomes visible through the ephemeral or durable condensation of water.

Again, some knowledge of fluid mechanics is required to understand these effects. A plane stays in flight by propelling air downwards with its wings, creating two continuous vortices corresponding to the air's downward movement (much as a spoon used to stir coffee creates two vortices). Via the process of Lagrangian chaos, the two vortices mix the burnt gas from the jet engine and the air dragged by the wing. Contrarily, their rotating motion creates a barrier against mixing with the surrounding fluid. If the water vapour concentration inside the vortex is dense enough, ice crystals or drops are formed that make visible the two vortices created by the plane's trail. The two vortices, made evident by the condensation cloud, can form great loops through pinching instability (often called Crow's instability, after its discoverer)³ revealing yet another topology of artificial cloud. These instability loops destroy the vortices and mix the air of the trail with the surrounding air.

At this point, either the contrail disappears when the air is dry enough or the trail slowly expands, the white puffiness blocking out the blue of the sky. The latter occurs when the air is oversaturated with water vapour but devoid of condensation nuclei so that drops cannot form. Thus the plane's motion

Le problème du changement climatique – souvent appelé réchauffement climatique – est beaucoup plus complexe à décrire car les processus physiques en jeu sont multiples et impliquent l'atmosphère, l'océan mais aussi les nuages et brouillards, la biosphère et la cryosphère. L'invisibilité de la pollution, par exemple par les gaz à effets de serre comme le CO₂ ou par des oxydes de soufre ou d'azote, la très grande variabilité interannuel du climat, mais aussi les très nombreuses rétroactions inconnues ou mal connues entre un très grand nombre de variables (champ de température, de pression, de vitesse de densité, de nuages, couvert végétal, neige, banquise, etc.) et la latence entre effets et causes, rendent délicate la mise en évidence, en mots ou en images, des changements climatiques.

Le climat résulte de deux effets principaux, le forçage radiatif et les effets de transport de chaleur, verticalement (par convection) ou horizontalement. Le forçage radiatif est complexe, chaque couche de l'atmosphère et de l'océan peut absorber, réfléchir ou transmettre le rayonnement qui vient du soleil, de la terre ou d'une autre couche. Ainsi, plus les nuages seront denses, plus ils réfléchiront directement les rayons solaires. Ils le feront différemment suivant l'épaisseur du nuage et la taille des gouttes d'eau ou des particules de glace, en absorbant une partie et se réchauffant. Ainsi la lumière transmise par le nuage sera plus ou moins intense et lourde de promesse de pluie. Cette réflectivité d'une couche peut par exemple se mesurer par l'albédo, la moyenne de la fraction de lumière réfléchi par rapport à la lumière incidente. L'albédo d'un nuage n'est pas seulement fonction de la quantité de vapeur d'eau qu'il contient mais aussi de la taille des gouttes et même de leur arrangement dans l'espace. De même un sol recouvert de neige ou un océan de glace aura un très fort albédo renvoyant tout le rayonnement solaire vers l'infini et au delà.

L'exemple des traînées de condensation (contrail) des avions illustre la complexité de la formation des nuages et de leur impact. En effet, les jets commerciaux volent en croisière entre 10000 et 12000 mètres d'altitude, juste sous la stratosphère, et la combustion de leur moteur rejette à la fois du CO₂, de la vapeur d'eau et des polluants oxyde de soufre ou d'azote en particulier. Suivant l'air environnant il laisse une traînée invisible ou visualisée par la condensation éphémère ou durable de l'eau. Une fois encore un peu de connaissance en mécanique des fluides est nécessaire pour comprendre cet effet. Un avion se maintient en propulsant l'air vers le bas par ses ailes, créant ainsi en continu deux tourbillons correspondant au mouvement de descente de l'air (comme la cuillère déplacée dans le café crée deux tourbillons). Ces deux tourbillons mélangent par chaos lagrangien les gaz brûlés du réacteur avec l'air entraîné par l'aile, mais leur mouvement de rotation crée une barrière au mélange avec le fluide environnant. Si la concentration en vapeur d'eau dans le tourbillon est suffisante, des cristaux de glace, ou éventuellement des gouttes, se forment et rendent visibles les deux tourbillons de la traînée de l'avion. Ces deux tourbillons visualisés par le nuage de condensation forment souvent par une instabilité de pincement (dites instabilité de Crow³ du nom de son découvreur) de grands anneaux, manifestant ainsi une autre topologie de nuage artificiel. Ces instabilités détruisent le tourbillon et mélangent l'air du sillage avec l'air environnant. Il se produit alors, soit la disparition de la traînée de condensation au profit du ciel clair lorsque l'air est suffisamment sec, soit l'extension lente de celle-ci qui finit par manger le bleu du ciel. Ce dernier cas arrive lorsque l'air est sursaturé en vapeur d'eau mais que, dépourvu de noyau de condensation, les gouttes ne peuvent se former. Le passage de l'avion a ainsi pour effet d'ensemencer l'air en particules d'oxyde de soufre ou d'azote sur lesquelles la vapeur peut se condenser comme dans le *Smog* londonien. Il se produit alors l'analogie d'une catastrophe où l'air clair à l'altitude de l'avion passe progressivement à l'état de cirrus fait par l'homme, laissant

sows the air with sulphur oxides or nitrogen particles onto which water vapour may condense, the same catastrophic process that generated London's smog, although in this case the clear air at the plane's height progressively changes into wisps of man-made cirrus, leaving a pallid sun at the end of the day. When air traffic was stopped for three days in September 2001, scientists were able to verify the impact of contrails and observe a warming effect, as artificial cirrus clouds no longer deflect sunlight back out into space.

The fact that these contrails are visible in the sky on a daily basis, indicates how important clouds are to the mechanics of radiation balance, as well as in the determination of complex cloud formations and their resultant shapes. Not only do air temperature and the water vapour present in the air (which comes from ocean evaporation as well as the evapotranspiration of soil and vegetation) intervene in the radiation process, but they also affect the nature and number of condensation nuclei without which drops or ice crystals cannot form. Such nuclei originate naturally from the salt and plankton in ocean spray and the desert sand and artificially in sulphur and nitrogen oxides and the soot from industry, transportation exhaust, and heating systems. Thus no cloud today is completely natural, but always includes a hidden component due to human activities.

The presence of man-made condensation nuclei increases the acidity of rain. These nuclei were quite numerous in the fifties, sixties and seventies, before the Convention On Long Distance Cross-border Atmospheric Pollution³ which committed to improvements in the filtration processes of the smoke emitted by gasoline refineries. This in turn led to progressive reduction in urban pollution and acid rain in countries that had signed the convention agreement and those that had not. For just as with CFC, pollution due to man-made condensation nuclei, is a global problem.⁴

Since the post-war economic boom, pollution has been thickening the cloud cover. Some scientists today hypothesise that the cooling effect of the average albedo increase, caused by man-made clouds, has masked the effect of greenhouse-effect gases during this time. Early on, one type of pollution limited the effects of the other. Warming began increasing when acid pollution started decreasing. The contrails left by planes and the clouds that produce acid rain are both visible man-made clouds, unwittingly and almost unconsciously generated by human activity. However, there are more obviously insidious projects in climatic engineering (or even of climatic warfare) in which the cloud cover is created, either to control precipitations, or to raise the albedo and limit warming.

The earliest rudimentary experiments were carried out around the world towards the end of the 1940s (Langmuir and Schaefer's work in the United States, Eyraud's in France). Two strategies were used: quickly cooling clouds with ground dry ice, or sowing the clouds or the air with condensation nuclei such as silver iodide. After the Vietnam war, during which cloud-sowing was used by the United States army to prolong a monsoon, the United Nations 31/72 Resolution was adopted on December 10th, 1976. It forbade the use of climatic manipulations as weapons. In 1978 the treaty was signed by the United States.

Today, there is a strong temptation to use climatic engineering to manipulate clouds and fine rain through sowing in order to limit climatic warming. The idea is supported by oil corporations and could turn out to be quite dangerous. While sowing on a large scale may limit the changes in the average temperatures on the ground, it would also modify the vertical and horizontal profiles of temperature and precipitation, with uncontrollable effects. Moreover, such projects include the release of sulphur or nitrogen oxides into the higher strata of the atmosphere (the cost of silver iodide would be far too

en fin de journée un soleil blafard. Lors de l'arrêt du trafic aérien pendant 3 jours en septembre 2001, les scientifiques ont pu objectiver l'impact de ces traînées de condensation et observer un réchauffement, ces cirrus artificiels ne renvoyant plus la lumière du soleil.

L'expérience que l'on peut faire tous les jours de ces traînées de condensation met en lumière l'importance des nuages dans le bilan radiatif et la complexité de leur formation et de leur forme. Ainsi non seulement comptent la température de l'air, la vapeur d'eau incluse dans l'air provenant de l'évaporation des océans et de l'évapotranspiration des sols, mais aussi la nature et le nombre des noyaux de condensation sans lesquels les gouttes ou les cristaux de glace ne peuvent se former. L'origine naturelle de ces noyaux est principalement le sel des embruns de l'océan et le sable des déserts à laquelle s'ajoute une origine anthropique, avec les oxydes de soufre, d'azote et les suies de nos industries, chauffages et moyens de transport. Ainsi plus aucun nuage n'est aujourd'hui d'origine purement naturelle mais comporte une part cachée due aux activités humaines. Ces noyaux de condensation anthropiques acidifient les pluies. Ils étaient très nombreux dans les années cinquante, soixante et soixante dix, avant que la « Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance » n'engage vers l'amélioration des procédés de filtration des fumées et de raffinage des essences, ce qui permit de réduire progressivement la pollution des villes et par la même l'acidité des pluies sur le territoire des pays signataires ou non signataires car, comme pour les CFC, la pollution par les noyaux de condensation anthropiques est globale⁴.

Pendant ces trois glorieuses décennies, cette pollution a augmenté la couverture nuageuse et certains chercheurs formulent actuellement l'hypothèse que le refroidissement provoqué par l'augmentation moyenne de l'albédo, dû à ces nuages d'origine anthropique, a masqué l'effet des gaz à effet de serre pendant cette période. Une pollution limite l'effet de l'autre et le réchauffement s'accroît depuis que la pollution acide diminue. Les traînées de condensation des avions où les nuages des pluies acides sont donc des nuages visibles engendrés par l'activité humaine, involontairement et presque inconsciemment, des *mindless* « *man made clouds* ». Mais il existe d'autres projets d'ingénierie climatique (où même de guerre climatique) où la couverture nuageuse est créée, soit pour contrôler la précipitation, soit pour augmenter l'albédo et limiter le réchauffement. Les premiers essais à échelle 1 ont eu lieu un peu partout dans le monde à la fin des années quarante, avec en particulier les travaux de Langmuir et Schaefer aux USA, Eyraud en France. Deux stratégies étaient employées, celle de refroidir brusquement le nuage avec de la carboglace pillée, ou celle d'ensemencer le nuage ou l'air en noyaux de condensation comme l'iodure d'argent. Après la guerre du Vietnam où l'ensemencement des nuages fut utilisé par l'armée des USA pour prolonger la mousson, la résolution 31/72 des Nations Unies de non usage des manipulations climatiques comme arme de guerre fut adoptée le 10 décembre 1976 et le traité signé par les États Unis en 1978. Aujourd'hui la tentation d'utiliser l'« ingénierie climatique » pour manipuler par ensemencement les nuages et les pluies afin de limiter le réchauffement climatique est aujourd'hui très forte. Cette idée est soutenue par les grands groupes de l'industrie pétrolière mais peut s'avérer très dangereuse car des ensemencements grande échelle pourraient certes limiter le changement de température moyenne au sol, mais modifieraient les profils verticaux et horizontaux de température et les précipitations, ce qui aurait des effets incontrôlables. De plus, ces projets imaginent libérer dans la haute atmosphère des oxydes de soufre ou d'azote, car le coût de l'iodure d'argent serait prohibitif pour un ensemencement de grande échelle, provoquant un voile de nuage acide en très haute atmosphère. Les incertitudes de ces projets sont grandes car la durée de vie de ces éléments peut être très longue s'ils rentrent dans la stratosphère (comme

high for sowing on a large scale), which is likely to create an acid cloud veil in that strata. It is unclear how long the elements involved in these projects will live once they have entered the stratosphere (as we know today from the misadventure of CFC). Deliberately injected acid pollutants can reach very high quantities of about 20% of current rejections.

In the 1940s, another man-made cloud appeared with terrifying effects, born of atomic energy and taking the shape of a monstrous mushroom radiating across our collective imagination and leaving nothing of men but their shadows burned into the walls. In 1950, scientist Geoffrey Ingram Taylor, who had been using thermal plumes to rid air force runways of fog in WWII, determined the amount of energy emanating from an atomic bomb through the simple observation of a film showing an explosion, a top secret film the United States military had carelessly made public. He simply used the dimensional analysis based on the ratio in time or in characteristic forces, which allowed him (after starting with small scale experiments on thermal plumes in air or water) to find the properties of larger plumes, even radioactive ones. The same law of similitude has been used empirically by Hollywood to create a dreadfully realistic dynamic model of a nuclear mushroom cloud.

It was only much later with Chernobyl that a second type of nuclear cloud appeared, almost immaterial, terribly dangerous and capable of affecting an entire continent. Although invisible, this type of cloud has a complex shape made of alternating areas and volumes in which the concentration of radioactivity is almost the same as at the source. As described above to explain the distribution of pieces from the ozone hole in the polar vortex, the local conservation of the rotation rate of one particle of fluid turns vortices into invisible, but robust, material objects. They are protected by the gyroscopic effect. The radioactive pollution trapped in the vortices will remain concentrated, as the edges of the vortex form a barrier against mixing. At the same time, the parts located between the vortices will be stretched and folded in a Lagrangian chaotic mixing that will dilute them. In the course of such dynamic processes, the areas of strongest stretching, as measured by the local Lyapunov number⁵, will draw a crucial density of filaments to them, causing a significant concentration of pollutants.

In like manner, the ash clouds of Alaska's ever active volcanoes are studied operationally⁶ by using the local Lyapunov equation to locate the concentrated ash filaments. Invisible radioactive clouds obey the same double dynamic of mixing and segregation directed by stretching and rotation, which explains the complexity of distant fall out and the existence of hot spots with very high concentrations of radioactivity.

The Fukushima catastrophe has produced two new types of man-made clouds, one that propagates in the ocean and the other in the ground. The cloud under the ground spreads out over a time span exceeding decades. The ground is a porous matrix and ground water flows by gravity, rubbing slowly against the matrix. Various diffusion and mixing properties are related to the existence of quick routes such as faults and to slow detours caused by cavities. Rapid movements called Lévy flights and the contaminating cloud may move fast, with hyper-diffusion effects⁷ linked to flights, while other parts remain caught up in the cavities for a very long time. The two effects unfold over centuries in a dramatic slow motion catastrophe.

The second type of cloud, also invisible, moves in the ocean. The ocean is massive. The top ten-metre layer has the same mass as Earth's atmosphere. The average surface currents are created by winds over all basins. Current speeds in that surface layer are about one metre per second and ten to a hundred times less than in the atmosphere, the ocean surface's characteristic speed times are thus

nous le savons aujourd'hui avec l'aventure des CFC) et la quantité de polluant acide injectée volontairement très grande – de l'ordre de 20% des rejets actuels.

Les années 40 virent l'apparition d'un autre nuage créé par l'homme, terrifiant par ses effets, utilisant l'énergie atomique et prenant la forme d'un champignon monstrueux irradiant l'imaginaire de la planète, ne laissant des hommes que leur ombre portée sur un mur. Le savant Geoffrey Ingram Taylor, qui employait pendant la Seconde Guerre mondiale les panaches thermiques de brûleurs pour dégager les terrains d'aviation militaire du brouillard anglais, utilisa en 1950 la loi d'échelle qu'il avait établie pour déterminer l'énergie dégagée par une bombe atomique par la simple observation d'un film d'explosion imprudemment rendu public par les militaires américains et alors que cette information était classée top secret. Il se servit seulement de l'analyse dimensionnelle basée sur le rapport de temps ou de forces caractéristiques permettant à partir d'expérience petite échelle de panache thermique dans l'air ou dans l'eau, de trouver les caractéristiques de panaches plus grands, fussent-ils radioactifs. Cette loi de similitude a été utilisée empiriquement par Hollywood pour créer dans l'eau un modèle dynamique de champignon nucléaire terriblement réaliste.

Ce n'est que bien plus tard, avec Tchernobyl, qu'un second type de nuage nucléaire est apparu, presque immatériel, terriblement dangereux et global capable d'affecter un continent entier. Bien qu'invisible, sa forme est complexe car faite d'une alternance de zones mélangées et de volumes où la concentration en élément radioactifs est presque la même qu'à la source. Comme nous l'avons décrit pour les lambeaux du trou d'ozone, la conservation locale du taux de rotation d'une particule de fluide sur elle-même fait que les tourbillons sont des objets matériels, eux aussi invisibles, mais robustes protégés par l'effet gyroscopique. La pollution piégée dans les tourbillons restera concentrée, les bords du tourbillon opposant une barrière au mélange. En revanche, les parties entre les tourbillons seront étirées et pliées dans un mélange lagrangien chaotique qui les diluera. Dans cette dynamique, les zones à fort étirement, mesuré par le nombre de Lyapunov local⁵, attireront une densité importante de filament et donc une concentration significative de polluant. Les nuages de cendre des volcans d'Alaska sont opérationnellement⁶ suivis en utilisant cette notion de Lyapunov local pour localiser les filaments concentrés de cendre. Les nuages invisibles radioactifs obéissent à cette double dynamique de mélange et ségrégation pilotée par l'étirement et la rotation, ce qui explique la complexité des retombées à distance et l'existence de *hot spots*, points chauds où la concentration est très élevée.

La catastrophe de Fukushima a mis en évidence deux autres nouveaux types de nuages faits par l'homme qui se propagent respectivement dans l'océan et dans le sol. Le nuage souterrain se déploie lentement, sur des temps caractéristiques allant au-delà de la dizaine d'années. Le sol est en effet une matrice poreuse et l'eau des nappes phréatiques s'écoule par gravité, en frottant sur la matrice, donc très lentement, avec des propriétés de diffusion et de mélange liées à l'existence de chemins très rapides, comme les failles, et de détours très lents, comme les cavités. Les déplacements très rapides s'appellent « vol de Levy » et le nuage contaminant va à la fois se déplacer vite, avec des effets super-diffusifs⁷ liés aux vols, mais aussi rester très longtemps piégé par les détours. Ces deux effets vont se déployer patiemment, pendant des siècles, dans un ralenti dramatique. Le second type de nuage, lui aussi invisible, se déplace dans l'océan. L'océan est massif, la première couche de dix mètres représente la même masse que l'ensemble de l'atmosphère. Les courants moyens de surface sont bien connus et créés par les vents sur l'ensemble des bassins. Les vitesses dans cette couche de surface de l'ordre du mètre par seconde

proportionally ten to a hundred times greater than in the atmosphere. The same dynamic of mixing and conservation applies, according to the vortex-like nature of the flow. It follows that in the Pacific Ocean hot spots are found with an irradiation rate comparable to hot spots close to the damaged nuclear plant. As indirect evidence, oceanographers found in 1985 that water lentils riding currents in the Mediterranean (called Meddies)⁸ were travelling at a depth of one thousand metres in the Atlantic and taking three years to reach the Caribbean before going north. As with the polar vortex, density and rotation effects can explain such longevity. Fukushima's toxic ocean cloud spreads in a stealthy fashion in the Pacific. Its impact may be very different from that of Chernobyl, because life in the ocean settles in volume rather than in surface as on the ground. Phytoplankton, nanoplankton, and diatom clouds, which absorb more than half of the carbon dioxide in the atmosphere and emit most of the oxygen, are being modified by human interaction and pollutants, especially nuclear pollutants.

A new liquid continent has entered the anthropocene. This relatively new geological age is unfamiliar. Man made changes have affected all natural cycles, manifested in visible and invisible clouds, massive and tangible. The ratio between cause and effect is beyond our understanding. Other catastrophes, folds in the imaginary surface of the continuum of states, will definitely appear each with its own time-scale, a geological time, which even when accelerated by the brutality of human actions is not the time-scale of the reckless human. We are entering the age of latent impacts, ineluctable and deadly.

Jean-Marc Chomaz is CNRS research director at the École Polytechnique Hydrodynamics Laboratory (Ladhyx) and professor at École Polytechnique.

NOTES

1. Gas formed through the ionisation of stratospheric oxygen by ultra-violet sun rays (UV).
2. Lagrangian chaos: chaos derived from the simple transport of particles from a two-dimensional, continuous speed field. That speed field must be unstable in time for particle trajectories to become chaotic. When three-dimensional, an unstable field may allow chaotic trajectories.
3. Crow's instability (after the name of its discoverer): symmetrical instability of two parallel counter-rotating vortices having as its effect to alternately bring the vortices together and away one from the other. A large amplitude such as varicose distortion creates a vortex loop through reconnection. It is currently visible on contrails, the condensation trails left behind by jet engines.
4. The 'Convention on long distance cross-border atmospheric pollution' now gathers 46 countries from Europe and Central Asia, the European Community, the United States and Canada. It was elaborated by the UN Economic Commission for Europe (ECE-ONU). A resolution was signed in Geneva in 1979 and came into force on January 28th 1988.
5. Local Lyapunov number: measure of the divergence in the trajectories of two initially close particles. The famous butterfly effect is one illustration of such divergence in trajectories which determines the future trajectory of the considered system in a non-causal but deterministic way.
6. Operationally: a term indicating that a real-time prediction is constantly obtained and provided to the competent authorities, here relating to the regulation of air traffic.
7. Hyper-diffusion effects: taking place on a faster average time-scale than the diffusion law that implies that the radiation developing from a spot grows as a square root of time. In hyper-diffusion cases the spot's radiation grows to a power exceeding one half, like time does.
8. Meddies: Mediterranean eddies.

sont dix à cent fois plus faibles que dans l'atmosphère et les temps caractéristiques de l'océan de surface sont donc proportionnellement dix à cent fois plus grands que dans l'atmosphère. La même dynamique de mélange et conservation en fonction de la nature tourbillonnaire de l'écoulement s'applique. Il existe donc forcément dans le Pacifique des « points chauds » avec un niveau d'irradiations comparable à celui à proximité de la centrale dans le Pacifique. Pour preuve indirecte, les océanographes ont réalisé en 1985 que des lentilles d'eau de la Méditerranée non mélangées – que l'on appelle Meddies⁸ – voyageaient à mille mètres de profondeur dans l'Atlantique et mettaient trois ans à atteindre les Caraïbes avant de remonter vers le Nord. Comme pour le tourbillon polaire, les effets de densité et les effets de rotation expliquent cette longévité. Le nuage océanique toxique de Fukushima se déploie donc de manière invisible dans le Pacifique. L'impact peut être très différent de celui de Tchernobyl, la vie dans l'océan s'établit en volume et non en surface, comme sur la Terre. Les nuages de phytoplancton, de cocolithophoridés et de diatomées qui absorbent plus de 50% du CO₂ et produisent la majorité de l'oxygène que nous respirons commencent à être modifiés par l'action humaine, l'acidification des océans et les pollutions, nucléaires en particulier.

C'est tout un nouveau continent liquide qui rentre dans l'Anthropocène... Ce nouvel âge géologique nous est inconnu. Les modifications faites par l'homme de tous les cycles et éléments naturels, nuées visibles ou invisibles, sont grands et tangibles. La proportionnalité des causes et des effets ne peut pas être respectée. D'autres catastrophes, des plis dans la surface imaginaire du continuum des états, vont se manifester, chacun avec son échelle de temps, un temps géologique, un temps qui même accéléré par la brutalité de notre action collective n'est pas celui de l'inconscience humaine. Nous entrons dans l'âge des impacts latents, inéluctables et mortels.

Jean-Marc Chomaz est attaché au CNRS et directeur de recherches au laboratoire d'hydrodynamique (Ladhyx) de l'École Polytechnique, où il enseigne.

NOTES

1. Gaz formé par ionisation de l'oxygène stratosphérique par le rayonnement solaire ultraviolet (UV).
2. Chaos Lagrangien : chaos dû au simple transport de particules dans un champ de vitesse continue, à deux dimensions ce champ de vitesse doit être instationnaire pour que des trajectoires de particules deviennent chaotiques, à trois dimensions un champ stationnaire peut admettre des trajectoires chaotiques.
3. Instabilité de Crow : du nom de son découvreur, instabilité symétrique de deux tourbillons contrarotatifs parallèles dont l'effet est de rapprocher et éloigner périodiquement les tourbillons, à grande amplitude cette déformation variqueuse provoque la formation d'anneau tourbillonnaire par reconnection. Elle est couramment visible sur les *contrails*, sillage de condensation derrière les avions à réacteur.
4. La « Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance » rassemble aujourd'hui 46 pays d'Europe et de l'Asie centrale, la Communauté européenne, les États-Unis et le Canada. Elle a été élaborée dans le cadre de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-ONU). Elle a été signée à Genève en 1979 et est entrée en vigueur le 28 janvier 1988.
5. Nombre de Lyapunov local : mesure de la divergence des trajectoires de deux particules initialement voisines. Le célèbre effet papillon est une illustration de cette divergence des trajectoires qui de façon déterministe mais non causale détermine le futur du système considéré.
6. Opérationnellement : terme indiquant qu'une prévision en temps réel est continuellement obtenue et fournie aux autorités compétentes en l'occurrence la régulation du trafic aérien.
7. Super-diffusifs : qui se produit avec une loi d'échelle en temps plus rapide que la loi de diffusion impliquant que le rayon d'une tache qui diffuse grandisse en racine carrée du temps. Dans le cas super-diffusif le rayon de la tache grandira comme le temps à une puissance supérieure à 1/2.
8. Meddies : signifie Méditerranéan eddies, littéralement tourbillons d'eau de la Méditerranée.



ÉDITIONS HYX
ARCHITECTURE, CONTEMPORARY ART,
DIGITAL CULTURES, PHILOSOPHY, LITERATURE
1, RUE DU TAUREAU - F-45000, ORLÉANS
T/P : +33 (0)2 38 42 03 26
FAX : + 33 (0)2 38 42 03 25
MAIL : CONTACT@EDITIONS-HYX.COM
WWW.EDITIONS-HYX.COM

BOOK PRINTED IN BELGIUM BY GRAPHIUS, GHENT, AUGUST 2016
EX LIBRIS PRODUCED BY POLLINARIA, ITALY, FABRICATED IN THE UK
BY VASEEM BHATTI / EHQUESTIONMARK, 2009-2015

ISBN 978-2-910385-77-4

© 2016 EDITIONS HYX & HEHE (HELEN EVANS & HEIKO HANSEN)
& THE AUTHORS. ALL RIGHTS RESERVED.



PRIÈRE DE FUMER CE LIVRE
PLEASE SMOKE THIS BOOK