

Sommes nous à la veille d'un basculement climatique brutal et irréversible?

François Louchet

<https://sites.google.com/site/flouchet/>

Si la Terre faisait 1m de diamètre, l'atmosphère ferait environ 1 mm d'épaisseur! C'est dans ce film si mince et si fragile que la vie telle que nous la connaissons, et la nôtre en particulier, a pu apparaître progressivement, et évoluer au gré des phénomènes naturels qui lui étaient imposés.

Des basculements climatiques importants ont eu lieu par le passé, auxquels la vie en général a résisté, au prix de la disparition de nombreuses espèces qui n'ont pas eu le temps de s'adapter. Ce fut le cas lors de l'épisode PETM (Paleocene-Eocene Thermal Maximum), qui s'est produit il y a 56 millions d'années [1]. Une succession d'éruptions volcaniques a alors provoqué une augmentation de la concentration en gaz à effet de serre (GES), conduisant à un accroissement de la température atmosphérique estimée entre 2°C et 9°C, étalée sur 20000 ans [2].

Depuis, des ères glaciaires et interglaciaires se sont succédées, correspondant à des fluctuations de température de quelques degrés. La dernière glaciation s'est achevée par un réchauffement de seulement 4°C étalé sur 10000 ans. Mais ce modeste réchauffement a eu des conséquences considérables à l'échelle humaine, à travers une fonte massive des glaciers. C'est ainsi que sont apparus les profondes vallées glaciaires des Alpes (Gresivaudan, vallée de l'Arve à Chamonix), les lacs Léman et du Bourget, les grands lacs d'Amérique du Nord, que la remontée du niveau des océans a séparé les îles Britanniques du continent, etc....

Les hominidés, apparus il y a "seulement" 7 millions d'années, ont réussi jusqu'à présent à survivre tant bien que mal à ces bouleversements, au prix de la disparition des

plus vulnérables, et de nombreuses migrations.

Mais depuis 150 ans l'ère industrielle est venue modifier la situation à une vitesse considérable comparée aux évolutions naturelles. L'injection massive de CO₂, ainsi que ses effets induits comme le dégagement de méthane du pergélisol, gaz à effet de serre plus de 20 fois plus efficace que le CO₂, a déjà provoqué une augmentation de la température atmosphérique moyenne de près de 1°C en seulement un siècle (1910 -2010).

Nous sommes donc actuellement très au delà du rythme qu'ont connu les épisodes précédents (entre 0,01 et 0,045°C/siècle pour le PETM) alors que nous essayons" (en vain) de nous limiter à 2 ou 3°C d'ici quelque décennies. L'évènement climatique présent est totalement inédit à la fois par la rapidité de son "forçage" et par sa vitesse de réchauffement. Les conséquences à moyen et même à très court terme sont à la fois extrêmement inquiétantes et très difficiles à prévoir.

Les prédictions de l'évolution du climat sont en effet couramment basées sur des extrapolations de l'évolution actuelle [3]. C'est une tâche extrêmement complexe et difficile, pour plusieurs raisons. Les mécanismes impliqués dans l'évolution climatique ne sont pas eux-mêmes connus avec précision, et les données sont parfois biaisées car effectuées par des organismes différents utilisant des techniques diverses. Ces prédictions, pessimistes dans tous les cas, ont un inconvénient majeur, car elles sont sous tendues par l'hypothèse implicite qu'une cause continue ne peut avoir que des conséquences continues. Ce point est fondamental, car de nombreux systèmes peuvent réagir de façon discontinue à une sollicitation continue.

La théorie des systèmes dynamiques a été initiée par les travaux d'Henri Poincaré dès la fin du XIX^e siècle. Dans le cas du climat, elle permet de montrer que les fluctuations climatiques de plus en plus fréquentes et intenses que nous observons actuellement peuvent être interprétées comme signes annonciateurs d'un basculement brutal du climat qui pourrait nous emmener beaucoup plus loin que ne prévoient les extrapolations continues couramment utilisées [4]. Ce comportement est caractéristique de l'approche de ce qu'on appelle en physique un point critique. Outre son caractère brutal, une telle transition est potentiellement irréversible. Si nous attendons d'être arrivés dans la zone de transition pour décider de réduire drastiquement nos émissions de gaz à effet de serre, ce sera trop tard et le climat ne pourra pas revenir à son état antérieur.

Qu'est ce qu'un point critique? Considérons un ensemble de dominos posés verticalement au hasard sur une table horizontale. Que se passe-t-il si l'on fait tomber un domino? S'ils sont suffisamment espacés, soit le domino déséquilibré est seul à tomber, soit il entraîne quelques autres dans sa chute, et tout s'arrête là. Si on augmente la "densité" de dominos (nombre au mètre carré), la chute du premier entraînera en moyenne celle de 1 ou 2 de ses voisins, qui eux-mêmes en feront tomber quelques autres, et ainsi de suite. Le nombre de dominos concernés par cette réaction en chaîne sera d'autant plus important que leur "densité" sera forte. C'est "l'effet domino" bien connu. On comprend alors qu'il existe une densité moyenne limite pour laquelle certaines de ces avalanches pourront atteindre la taille de la table (théoriquement infinie). C'est le point critique.

On a un phénomène comparable si on incline progressivement une planche sur laquelle on a déposé auparavant une couche de sable sec. A mesure que la pente augmente, des avalanches se déclenchent, chacune étant une réaction en chaîne de grains de sable qui se bousculent. La fréquence et la taille de ces avalanches croît avec l'inclinaison de la planche. Lorsqu'on atteint la "pente critique", le système "diverge", et des avalanches de toutes tailles se produisent "aléatoirement" sur

l'ensemble du système. C'est un exemple type de fluctuations à l'approche d'un point critique. Au-delà, toute la couche de sable est déstabilisée et s'écoule brutalement vers le bas. Le nouvel état du système est très différent de l'état initial. Et si on remet progressivement la planche à l'horizontale, on se rend compte que le sable reste en tas, et ne revient pas gentiment s'étaler en couche uniforme sur la planche! La transition est irréversible

Cette divergence d'une réaction en chaîne est bien connue dans le domaine nucléaire: une centrale nucléaire fonctionne (en principe!) en régime sous-critique, la fission d'un noyau d'Uranium provoquant celle de moins d'un autre noyau en moyenne. Mais lorsque la fission d'un noyau entraîne celle de plus d'un autre noyau, la réaction s'emballe. On dit qu'elle "diverge", et on a une explosion nucléaire. Ces deux régimes sont séparés par un point critique, pour lequel, en moyenne, une fission de noyau en provoque exactement une autre. Les barres de contrôle sont là pour régler le facteur de multiplication des neutrons responsables de la fission des noyaux de "combustible" et empêcher la divergence. Il est clair qu'un réacteur qui aurait dépassé le point critique ne reviendrait pas en arrière, l'explosion nucléaire se produisant en un temps très bref. On voit donc qu'une variation continue du niveau des barres de contrôle peut déclencher un effet discontinu (explosion) lorsqu'on arrive au point critique, et que dans ce cas le passage du point critique est irréversible.

Un autre exemple est celui de la rupture d'un matériau pré-fissuré. Si on augmente progressivement la contrainte qui tend à le rompre, la taille de la fissure augmente, jusqu'à ce que pour une contrainte "critique" la fissure devienne instable et s'ouvre brutalement, ce qui provoque la rupture, qui est par nature irréversible. Dans un matériau hétérogène, comme un tissu par exemple, cette rupture est précédée de soubresauts correspondants à des microruptures de plus en plus fréquentes et importantes.

Prenons maintenant l'exemple d'un toboggan en forme de "montagne russe" sur laquelle on

fait peu à peu monter une boule à la force des bras. Si on relâche l'effort, la boule redescend: le phénomène est réversible. Mais à mesure qu'on s'approche du sommet et que la pente diminue, l'effort requis pour maintenir la vitesse de la boule constante diminue lui aussi. Si on maintient la force constante, la vitesse de la boule sur le toboggan augmente. Si on relâche l'effort, elle revient en arrière, mais moins violemment. C'est ce qu'on appelle le "ralentissement critique" [5]. Et lorsqu'on arrive au sommet, la boule dévale rapidement de l'autre côté, sans contrôle, et de façon irréversible. Si de plus des coups de vent aléatoires viennent perturber le processus, l'approche du sommet s'accompagnera de fluctuations de plus en plus importantes de la position de la boule, jusqu'à ce que l'une d'entre elles l'entraîne sur le versant opposé. On voit encore une fois qu'une cause continue peut avoir un effet discontinu, que l'évolution finale du système est irréversible, mais aussi que l'approche de la transition est accompagnée d'instabilités croissantes.

Les exemples de franchissement de point critique ne manquent pas dans la nature et ailleurs: rupture des matériaux, propagation explosive des épidémies, extinction des espèces ou des civilisations, effondrement des systèmes économiques ou politiques, etc... Ils résultent tous de variations continues des causes, et conduisent tous à des effets discontinus (pour le climat, voir [6]), qui sont très peu ou pas du tout réversibles. Il est donc primordial de savoir détecter à l'avance les signes avant coureurs de l'approche d'un point critique, de façon à pouvoir réagir à temps.

Si l'on revient au climat, il peut se faire qu'à un certain stade de son évolution, des soubresauts apparaissent sous la forme de fluctuations climatiques, comme canicules, vagues de froid, sécheresses, précipitations inhabituelles, cyclones, perturbations de courants marins (Gulf Stream), etc... Or c'est bien ce que nous observons actuellement [7]. Il est à craindre que ces fluctuations, comme dans le cas de la déchirure d'un tissu, nous annoncent l'imminence d'un basculement climatique.

Dans ce cas, bien que la comparaison avec l'épisode PETM ne soit pas totalement transposable, le saut de température qui nous attend risque d'être plus proche des 10° que des 2° ou 3° auxquels on essaye sans beaucoup de succès de se limiter. Ceci est d'autant plus vraisemblable que, à cause de l'activité humaine, et comme mentionné dans l'introduction, le rythme de forçage est de très loin supérieur actuellement qu'il ne l'était lors du PETM. Cela limite les possibilités d'adaptation du système, et plus particulièrement du vivant.

En résumé, la plupart des méthodes actuelles de prévision climatique sont basées sur des extrapolations continues des tendances observées dans le passé, qui ne sont connues qu'avec une précision limitée. Nous montrons ici que le problème peut être pris en sens inverse en se basant non pas sur les causes, relativement mal connues, de cette évolution, mais sur certaines de ses conséquences déjà observables. La théorie des systèmes dynamiques permet de prédire qu'un accroissement de la fréquence et de l'intensité des fluctuations climatiques que nous observons sont un signe précurseur de l'approche d'un basculement critique, qui provoquerait un saut brutal de température. Le réchauffement résultant de ce saut vers l'inconnu n'est pas chiffrable, mais sera vraisemblablement bien plus élevé que ce que prévoient les extrapolations continues, même les plus pessimistes, et sera très probablement irréversible à l'échelle humaine. Une prédiction quantitative du délai qui nous sépare de ce basculement serait bien utile. Elle est théoriquement possible grâce à des techniques développées pour d'autres phénomènes critiques [8-10], mais il faudrait pour cela disposer de mesures extrêmement précises et fiables sur les fluctuations climatiques présentes. Cela ne semble pas être le cas actuellement. Un effort de recherche dans ce sens est souhaitable. En attendant, on peut simplement espérer que l'humanité sera assez sage pour réagir par des mesures vigoureuses dès à présent, à moins qu'il ne soit déjà trop tard...

Le lecteur pourra trouver une version plus technique et fouillée de cet article, en anglais et en libre accès, sur le site en ligne arXiv géré par l'université Cornell (USA) [4].

Remerciements:

L'auteur est reconnaissant à ses collègues Jérôme Faillettaz (Université de Zürich) et Gerhard Krinner (CNRS, membre du GIEC) pour de fructueuses discussions.

Références:

- 1- https://en.wikipedia.org/wiki/Paleocene%E2%80%93Eocene_Thermal_Maximum
- 2- Cui Y., Kump L.R., Ridgwell A.J., Charles A.J., Junium C.K., Diefendorf A.F., Freeman K.H., Urban N.M. & Harding I.C. (2011). "Slow release of fossil carbon during the Palaeocene–Eocene Thermal Maximum". *Nature Geoscience*. 4 (7): 481–485. [doi:10.1038/ngeo1179](https://doi.org/10.1038/ngeo1179)].
- 3- Rapport du GIEC ou IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2013
- 4- Louchet F., Weather instabilities as a warning sign for a nearby climatic tipping point? <http://arxiv.org/abs/1609.05098>
- 5- <http://www.early-warning-signals.org/theory/what-is-a-critical-transition/>
- 6- Lenton T.M., Livina V.N., Dakos V., Scheffer M., Climate Bifurcations during the Last Deglaciation? *Clim. Past* (2012), 8, 1127-1139.

7- Current Extreme Weather Events. Weather Extremes in a Changing Climate: Hindsight on Foresight. World Meteorological Organization, Geneva (2010). http://.wmo.int/pages/mediacentre/news/extremeweather_sequence_2010_en.html.

8- Voight, B., A method for prediction of volcanic eruptions, *Nature*(1988), 332(6160), 125–130.

9- Amitrano, D., J. R. Grasso, and Senfaute G., Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical point phenomena, *Geophys. Res. Lett.* (2005), 32, L08314, doi:10.1029/2004GL022270.

10- Faillettaz J., Funk M. and Vincent C., Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives, *Rev. Geophys.* (2015), 53, 203–224, doi:10.1002/2014RG000466, open access at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014RG000466/pdf>

François Louchet est Ingénieur Civil des Mines, agrégé de Physique, Docteur ès Sciences Physiques, ancien Professeur des Universités en Physique de la Matière Condensée à l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Actuellement à la retraite, il poursuit ses activités de recherche, en particulier sur les aspect théoriques des instabilités en Physique et en Géophysique.

francois.louchet@yahoo.fr

<https://sites.google.com/site/flouchet/>

22 janvier 2017