

Penser la résilience. Un regard thermodynamique 1 : du concept de résilience

Christophe Goupil, Eric Herbert & Henri Benisty¹

Vous avez dit résilient ? Le mot résilience, sans autre forme de précision, occupe une part croissante des débats sur les transitions énergétiques et climatiques. Face à la surprise et à la désorganisation, la sidération laisse place à une tentative de réflexion, pour tenter de penser demain, à défaut de le prévoir. Penser dans l'incertitude est un exercice inconfortable et tout concept rassurant y est accueilli avec générosité, pour ne pas dire candeur. Nous voulons une société résiliente, comme un droit, en face duquel il y aurait un devoir régalién de garantir ce droit. Peu nombreux sont ces concepts qui peuvent à la fois rassembler et reconforter une société inquiète. La résilience en est un, et son acceptation par une large majorité est une mesure de l'étendue du flou que revêt ce mot. Explorer ce que recouvre ce mot et le confronter à ses pseudo-synonymes est l'exercice que nous proposons ici.

Historique d'un vieux concept

Bien connu dans son acception psychologique², le mot résilience décrit la capacité à traverser les épisodes traumatiques de la vie³. Cette définition est assez proche de celle que l'on attend pour une société car il s'agit bien d'un état dans lequel se trouve un sujet, ou un objet, après un traumatisme. Il est intéressant de remonter aux sources⁴ afin de le situer étymologiquement et historiquement. Issu du terme latin *resilire*, *resilio* signifie rebond, au sens du rebond de la flèche sur la pierre, ou du saut d'un animal. Si l'on se limite à cette antique définition, le système résilient est le système qui se résout, à regret, à la suite d'un choc, à changer de trajectoire, voire à bondir vers l'arrière. Par la suite, son sens évolue vers celui du retrait militaire : avec d'un échec, même temporaire et mû par une tactique, dont rien ne laisse penser qu'il sera suivie d'une victoire. C'est à Sir Francis Bacon, procureur général d'Angleterre⁵, que l'on doit la première étude scientifique sur l'utilisation du terme *resilience*. Dans son recueil d'écrits sur l'histoire naturelle, le *Sylva Sylvarum*, Bacon mentionne la résilience au cours d'une rêverie sur la force des échos⁶. Le terme conserve alors son sens de rebond. Ce n'est qu'à partir du milieu du XIX^{ème} siècle que le terme est utilisé pour signifier la capacité à se remettre face à l'adversité.

C'est la première fois que le sens du mot ne contient plus de connotation péjorative mais relève plutôt de la force d'âme⁷.

Mécanique de la résilience

Il faut attendre 1854, moment de deux grandes catastrophes sismiques au Japon, pour trouver dans le dictionnaire la mention de résilience qui caractérise alors la capacité du peuple japonais à se reconstruire dans l'adversité⁸. À la même époque, les sciences mécaniques s'emparent du mot, et, en 1858, l'ingénieur écossais William J. M. Rankine (1820-1872) l'utilise pour décrire la résistance de poutres⁹ en acier¹⁰. Le concept se trouve alors enrichi par d'autres mots qui permettent de qualifier l'état de résilience. La poutre est qualifiée de ductile ou fragile, douée de propriétés élastiques ou plastiques. Tous ces qualificatifs sont alors parfaitement définis en fonction du traumatisme reçu par la poutre, c'est-à-dire en fonction du choc ou de la déformation continue qui lui sont appliqués. Les conditions d'un traumatisme bref ou durable, son intensité, et surtout ses conséquences, trouvent alors un espace de description très riche, dans lequel la résilience n'est qu'une qualification d'un état post-traumatique possible parmi d'autres. À l'image de la fable du chêne et du roseau de La Fontaine, les futurs états post-traumatiques trouvent un

cadre de description. L'objet ductile, comme l'acier, peut subir un choc dont il gardera une marque sans grandes conséquences. Il peut subir un effort continu, qui le déformera élastiquement, mais il retrouvera sa forme initiale ensuite. Si l'effort continu dépasse en intensité un certain seuil élastique, il gardera une déformation plastique durable. La limite élastique dépend de la nature des objets, elle peut être très élevée pour des aciers spéciaux, ou quasi nulle pour la pâte à modeler.

La résilience n'est jamais le retour à l'identique, mais bien plus la marque d'une histoire traversée, avec toujours le retour à une certaine fonctionnalité, même si celle-ci concerne un objet déformé. Elle interroge une déviation dans ce qui avait valu à cet objet son statut même : certaines formes et fonctions qui se maintenaient à l'identique dans son usage commun. Dans le cas extrême d'absence de seuil élastique, on peut mettre en doute la capacité de résilience puisque la contrainte appliquée, dès lors qu'elle apparaît, déforme durablement. Si la ductilité est absente, l'objet est qualifié de fragile. Dans le cas du verre, le choc, ou la déformation continue, ne produisent strictement aucun effet visible rémanent en deçà d'un certain seuil... mais la destruction totale au-delà. L'objet fragile, par définition, n'a aucune résilience. Ajoutons que la résilience peut être une propriété intrinsèque de l'objet, mais elle peut aussi lui avoir été ajoutée, quand cela est possible, comme le sont ces contreforts que l'on adosse parfois aux bâtisses anciennes. L'état de résilience suppose donc deux choses. Tout d'abord, la capacité à tenir à distance la contrainte appliquée, c'est à dire à lui résister, s'y accommoder sans fragiliser sa structure. Il s'agit ensuite d'être capable d'absorber ce qui n'a pas pu être tenu à distance, au-delà d'une simple accommodation. Résister et absorber sont les déterminants incontournables de la résilience.

Vers la fin des années 1990, le concept de résilience transite de l'écologie naturelle à l'écologie humaine, c'est-à-dire aux sciences sociales, grâce aux travaux d'économistes¹¹ et de géographes¹². L'un des héritages de l'écologie est l'accent durable mis sur la stabilité comme marque de résilience, ce qui suppose

que les contraintes en jeu vont au-delà de l'accommodable. Étendu aux sociétés, le concept de résilience se caractérise ainsi¹³ :

- Une capacité à concevoir les moyens de résister à la catastrophe, à maintenir ou même restaurer son intégrité.
- Une capacité à produire un fonctionnement adapté aux circonstances produites par la calamité afin d'en atténuer les effets et leur impact.
- Une stabilité des fonctions durant la traversée de la catastrophe.

Selon le Bureau des Nations unies pour la réduction des risques de catastrophes (UNISDR), la résilience se définit par

« *The ability of a system, community or society exposed to hazards to resist, absorb, accommodate to and recover from the effects of a hazard in a timely and efficient manner, including through the preservation and restoration of its essential basic structures and functions*¹⁴. »

On y retrouve les différentes significations antérieures du terme : rebondir, s'adapter, surmonter et maintenir l'intégrité. On note que la résilience ne conduit pas nécessairement au retour à la situation pré-traumatique. La résilience laisse une marque, une trace du jeu, de la plasticité, une empreinte.

Une nature résiliente : éloge du couplage énergie-matière

Si la définition de la matière semble ne pas faire problème, celle de l'énergie est plus délicate. Au sens premier, l'énergie est l'unité de comptabilisation des transformations de la matière. Il s'agit donc d'une monnaie, dont le cours serait réputé ne pas avoir varié depuis les premiers âges de l'univers, ce qu'Emmy Noether avait en son temps magnifiquement démontré¹⁵.

Le fonctionnement des écosystèmes nous offre un regard critique sur nos propres sociétés et leur devenir. La première des leçons tirée de l'observation de la nature est simple : rien n'est possible si la matière ainsi que l'énergie pour mettre en œuvre cette matière

font entièrement défaut. Or il y aura toujours un degré de défaut. La résilience des systèmes vivants est donc en premier lieu la capacité à gérer les degrés plus ou moins importants de la pénurie tout autant que de l'abondance. Mais c'est aussi et surtout la capacité à développer des systèmes capables de s'adapter, avec des organes qui ne toléreront que de faibles degrés de défaut et d'autres qui au contraire opéreront malgré des degrés extrêmes dans le défaut ou l'abondance. En prenant langue avec la nature, le concept de résilience s'étend bien au-delà de son acception mécanique.

L'énergie et la matière sont en effet des partenaires indissociables dans le vivant. Tous les organismes, au long de leur existence, sont en quête de matière pour construire leur structure, et d'énergie pour agréger et modeler cette matière. Que l'une de ces deux sources vienne à se tarir, et c'est la mort à un terme plus ou moins bref. Si la quête de matière est importante pour croître et se régénérer, la quête d'énergie est tout simplement vitale.

Si la matière manque, l'organisme est en carence, si l'énergie manque, l'organisme meurt. Qu'il s'agisse de la graine en germination qui tente au plus vite, par la photosynthèse, de se coupler à la source d'énergie solaire, ou qu'il s'agisse de l'animal repu de graisse qui aborde l'hibernation, l'accès à l'énergie et son stockage sont déterminants à la survie. L'évolution a ainsi sélectionné de nombreuses stratégies d'accès aux ressources de matière et d'énergie.

Une question de principes thermodynamiques

Comme tout système, sociétés comprises, les systèmes biologiques sont soumis aux lois de la physique et de la chimie. Parmi celles-ci, deux principes thermodynamiques¹⁶ s'imposent. Le premier se trouve inscrit dans la célèbre citation de Lavoisier : *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme*. Énergie et matière se conservent donc. Ce principe est imparable puisqu'aucun organisme ne peut se développer s'il n'a pas accumulé assez de matière et d'énergie pour le faire. Que la plante manque d'azote, et sa croissance sera limitée. Que la graine ne parvienne pas à développer suffisamment de tige puis de

feuille et de photo-synthétique pour capturer les photons solaires, et son destin est scellé. Il en va de même pour toutes les prédatations, tel le félin courant après sa proie. Ce premier principe joue tout autant pour la matière que pour l'énergie : c'est un principe de quantité. Le second est un principe de qualité. Que stipule-t-il ? Il ne suffit pas qu'il y ait de l'énergie ou de la matière, encore faut-il qu'elles soient disponibles sous la bonne forme. En effet, si la plante manque de lumière, rien ne servira de lui apporter la même quantité d'énergie sous forme de chaleur. À quantité d'énergie égale, chaleur et lumière ne sont pas de qualité équivalente. Il en va de même avec la matière, où des quantités identiques de carbone, d'hydrogène et d'oxygène contenues dans des molécules structurées de glucose, ou bien simplement de dioxyde de carbone (CO₂) et d'eau, ne feront pas le même usage. Ce second principe, que l'on associe au concept d'entropie, indique que si la matière et l'énergie peuvent se disperser, elles se disperseront. Cette dure loi implique que toute matière structurée a tendance à se disperser, à se décomposer. De façon analogue pour l'énergie, toute activité physique s'accompagne de production de chaleur et donc de dispersion d'énergie.

Le jeu de la vie, qui inclut la vie des sociétés, est donc cette lutte pour la maintenance et la croissance, qui génèrent toutes les deux plus de dispersion qu'elles ne produisent de structuration¹⁷.

Résilience et finitude, une affaire de contraintes

Comment faire face à ces deux principes physiques implacables et réussir à développer ces courtes échelles innombrables que sont les organismes vivants dans leurs échanges mutuels d'énergie et de matière ? Comme on peut le voir, cela ne se résume pas au gros qui mange le petit, encore faut-il que la qualité de la ressource soit là. Si le lion ne mange pas de paille, c'est qu'il a de bonnes raisons ! En tant que système fermé, la Terre contient une quantité de matière limitée. Mais l'apport de l'énergie du soleil permet sa redistribution durable, y compris dans sa plus grande complexité, qui est celle du vivant. Le cycle de la

matière, animé par le flux solaire, est ce motif en boucle qui caractérise les processus métaboliques, où les mêmes éléments sont sans cesse réutilisés grâce à un apport constant et régulier d'énergie solaire.

Devant ce tableau contraint, à la fois par les principes de quantité et de qualité et par la finitude des ressources matérielles, il est tentant de penser, comme on le fait trop souvent, que les solutions trouvées dans la nature sont nécessairement les plus économes, les plus vertueuses, les plus efficaces, les plus propres... Avant d'accorder toutes ces qualités au vivant, il est important d'observer quelques exemples simples. Le cas de la photosynthèse est emblématique. Alors que les cellules photovoltaïques faites de main d'homme présentent des rendements de conversion du flux lumineux en énergie électrique allant de 20 à 30 %, la photosynthèse semble n'offrir que des rendements inférieurs ou égaux à 1 %. Une étude trop rapide conduit ici à des conclusions simplistes, voire erronées. Contrairement au panneau photovoltaïque, la plante est fortement contrainte, notamment car elle n'a pas accès à la variété des éléments présents dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïev. Si l'on applique aux cellules photovoltaïques la contrainte de disponibilité de la matière qui s'impose au vivant et s'imposera donc inexorablement à l'Homo Sapiens, on est alors conduit à considérer uniquement les cellules photovoltaïques dites organiques, qui sont constituées principalement de chaînes carbonées. Le hic est qu'elles présentent des rendements voisins de... 4 %. Voilà une première leçon donnée par la nature :

Les performances d'une technologie, d'un système, d'un organisme, d'une société, ne peuvent se comparer sans la prise en compte des contraintes qu'ils subissent.

Mais cette contrainte est aussi génératrice de créativité. En effet, qu'il s'agisse de la forme des feuilles améliorant la collection de la lumière et le transport des espèces chimiques synthétisées, les questions de forme du vivant sont des réponses à la présence d'une série de contraintes matérielles. Une autre illustration prise dans le domaine marin peut encore nous

éclairer. La présence de cétagés, animaux qui doivent maintenir une température proche de 37°C, dans des océans dont la température voisine les quelques degrés, semblerait une hérésie à tout bon ingénieur thermicien. Pourquoi avoir choisi une solution aussi dissipatrice d'énergie alors qu'il existe tant d'animaux dits à « sang froid » ?

Là encore, la réponse de la nature n'est pas celle de la performance tant espérée, mais celle de la contrainte, historique cette fois. En tant que mammifères, les cétagés sont des animaux « à sang chaud », qui le sont restés en passant de l'environnement terrestre à l'environnement marin. La leçon que nous pouvons en tirer est simple : *si cela est possible, cela peut perdurer*. En effet, moyennant un apport très conséquent en énergie, ces animaux assurent une conversion massive d'un combustible matériel (la nourriture) en énergie. Une fois encore, la matière peut se transformer selon des modalités variées, pour peu qu'il y ait un apport d'énergie suffisant, en quantité et en qualité.

Si cet apport d'énergie fait en partie défaut, tant en quantité qu'en qualité, la solution est nécessairement la sobriété énergétique, que l'on rencontre par exemple chez les paresseux, solution qui n'est en rien la norme. La sobriété n'autorise pas tout. L'observation du paresseux nous permet par exemple de constater que son déplacement est non seulement lent, mais contraint à rester lent, comme le serait une voiture que la sobriété contraindrait à rouler à une vitesse quasi constante. Ceci nous enseigne deux nouvelles lois, évidentes mais qui méritent qu'on les rappelle :

Ce qui est rare ne peut servir durablement à la production de masse.

Ce qui est rendu possible existe tant qu'il conserve l'accès à ses ressources.

Litanie des contraintes

Au-delà des questions d'acquisition de la ressource énergétique se pose celle de l'usage fait de cette énergie. Il est important de savoir si un système est prévu pour fonctionner à son maximum de puissance, à son maximum de rendement, ou bien encore, en minimisant l'énergie et la matière rejetées. Par exemple,

une voiture est-elle prioritairement conçue pour aller vite, pour consommer moins d'énergie ou pour rejeter moins de déchets ?

Que peut alors nous enseigner la nature dès lors que l'on veut capturer l'énergie et la mettre en œuvre avec efficacité ? Loin de simplement questionner la nature, à la recherche d'une hypothétique solution idéale, cette approche inscrit sa démarche dans un dialogue entre le concepteur humain et la nature. Ce cadre de travail est celui d'une litanie de contraintes pour l'ingénieur :

1. Contrainte de forme et de taille :

Comme l'indiquent les travaux de Darcy Thompson¹⁸, toutes les formes ne sont pas possibles, notamment au regard de l'échelle du système. Ainsi, telle solution, efficace à une échelle, ne le sera pas à une autre.

2. **Contrainte historique**¹⁹ : La nature ne revient pas en arrière. Si aucun ingénieur n'irait imaginer une solution « à sang chaud » pour un animal vivant dans les océans froids, force est de constater que la nature l'a fait avec les cétacés, sous la contrainte historique imposée par l'évolution. Cette observation nous conduit à prendre définitivement acte que la solution naturelle n'est pas nécessairement la plus économe, ni même la plus puissante.

3. **Contrainte de temps**²⁰ : L'évolution procède majoritairement à des évolutions par sauts, séparant des états d'équilibres successifs, les stases. De même, les sauts d'innovations technologiques se trouvent pilotés par le temps nécessaire pour laisser venir à maturation des technologies, mais aussi celles des sociétés.

4. **Contrainte de conditions aux limites**²¹ : Celle-ci gouverne les deux processus que sont l'acquisition de la ressource nourricière, et le rejet des déchets.

Cette dernière contrainte revient à penser le système dans son environnement et dans ses interactions avec ce dernier. En termes physiques cela revient à considérer deux cas extrêmes, l'un où la ressource est présente comme un stock dans lequel il suffit de puiser, et l'autre où elle se concrétise comme un flux qui irrigue directement. Ce qui est vrai pour la ressource l'est aussi pour les déchets qui ne peuvent être rejetés efficacement que s'il

existe un puits disponible pour les recevoir. Que ce puits fasse défaut ou s'engorge, ou que son accès soit restreint, et l'organisme ne pourra survivre durablement.

Stock et flux sont donc les déterminants à partir desquels la nature peut développer ses stratégies. Dans le cas des végétaux, la condition aux limites énergétiques est celle du flux solaire. Pour ces mêmes végétaux, la condition aux limites matérielles est en partie celle d'un flux de CO₂, en ce qui concerne la respiration, et celle d'un stock de nutriments enfouis, en ce qui concerne le système racinaire. L'observation de la graine devenant plantule est ici très illustrant. La graine germant est un système qui puise dans ses réserves qui constituent un stock limité. La croissance de la plantule se comprend comme une course contre la montre pour développer au plus vite les surfaces photo-synthétiques qui, fournissant un couplage croissant avec le flux solaire, assurent la transition d'un couplage à un stock limité mais dont la consommation est contrôlable, vers le couplage à un flux certes illimité dans le temps, mais dont le débit n'est pas contrôlable, sinon par la patience de l'être.

Adapté ou adaptable, il faut choisir

Le fonctionnement des organismes vivants ne peut jamais être considéré comme idéal au sens qu'il présenterait les meilleurs rendements, ni même comme performant, au sens où il développerait les puissances les plus importantes. Il s'en faut de beaucoup que les cétacés précités soient des animaux à rendement élevé. Il s'en faut aussi de beaucoup que l'on puisse considérer qu'un paresseux est un animal puissant. La règle que nous avons observée, et qui sera développée dans notre second article (*Penser la résilience. Un regard thermodynamique II*), est donc la suivante :

L'accès à des puissances importantes implique une dissipation d'énergie au repos conséquente, à l'image d'un véhicule de forte puissance qui nécessite une grande cylindrée, donc une consommation au ralenti également notable.

À l'inverse, l'accès à des rendements élevés impose une puissance au repos très réduite,

ce qui conduit à brider voire réduire drastiquement toute la plage d'usage dont dispose le système.

Là encore, notre regard ne doit pas se porter dans la direction du processus le plus vertueux au sens des classiques critères d'une machine ou d'une usine-atelier, mais plutôt dans la direction du processus qui, parmi les contraintes d'espace et de temps, fait le meilleur usage de la dissipation inéluctablement produite.

¹ Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de De-main, LIED.

² E. WERNER, « Children of the Garden Island », *Scientific American* 260(4), 1989, 76-89.

³ Le terme de résilience a commencé à être utilisé en psychologie dans les années 1950, et il est finalement devenu populaire dans ce domaine à la fin des années 1980. Cf. *Ibidem*.

⁴ D. E. ALEXANDER, « Resilience and disaster risk reduction : an etymological journey », *Natural hazards and earth system sciences* 13(11), 2013, 2707-2716.

⁵ E. GLINERT, *The London Compendium. A street-by-street exploration of the hidden metropolis*, Harmondsworth, Penguin, 2012.

⁶ F. BACON, *Sylva Sylvarum, or of Natural History in ten Centuries*, London, William Lee, 1625.

⁷ R. BELL, *Eminent Literary and Scientific Men*, vol. 2, Londres, Longman, Orme, Brown, Green & Longman, 1839.

⁸ R. TOMES, *The Americans in Japan ; An Abridgment of the Government Narrative of the U.S. Expedition to Japan Under Commodore Perry*, New York, Londres, D. Appleton and Co, 1857.

⁹ L'utilisation en mécanique des métaux s'est ensuite étendue à celle des fils et des tissus. Voir R. M. HOFFMAN, « A generalised concept of resilience », *Textile Research Journal* 18(3), 1948, 141-148.

¹⁰ W. J. M. RANKINE, *A Manual of Applied Mechanics*, Londres, Charles Griffin & Co., 1867.

¹¹ A. A. BATASYAL, « The concept of resilience : retrospect and prospect », *Environment and Development Economics* 3(2), 1998, 235-239.

¹² W. N. ADGER, « Social and ecological resilience ; are they related ? », *Progress in Human Geography* 24(3), 2000, 347-364.

¹³ D. E. ALEXANDER, « Resilience Against Earthquakes : Some Practical Suggestions for Planners and Managers », *Journal of Seismology and Earthquake Engineering* 13(2), 2012, 109-115.

¹⁴ United Nations Office for Disaster Risk Reduction, rapport UNISDR, 2009, 24.

¹⁵ E. NOETHER, « Invariante Variationsprobleme », *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1918 (2), 1918, 235-257.

¹⁶ La thermodynamique est une science qui permet de décrire et de quantifier les transformations, comme les évolutions ou encore les échanges, entre un système donné et son environnement extérieur. Les principes de la thermodynamique s'imposent à tous. Le vivant ne fait pas exception. Voir E. SCHRÖDINGER, *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie*, Paris, Éditions du Seuil, « Points Sciences », 1986. Subir ces principes, ou au contraire les intégrer en utilisant des voies tantôt subtiles tantôt grossières, telles sont les leçons que nous pouvons apprendre de la nature, dans ses efforts à construire la structure vivante.

¹⁷ Dans ces conditions de dégradation, comment la vie est-elle alors possible ? Cf. E. SCHRÖDINGER, *Qu'est-ce que la vie ?*, op. cit. La présence de l'énergie solaire permet à la plante de structurer une matière dispersée dans le sol et dans l'air. Cette matière végétale structurée fournit à la fois matière et énergie à l'herbivore et ainsi de suite, tout au long de la chaîne trophique. Il y a toujours, *in fine*, plus d'énergie dispersée que structurée. Le flux solaire permet donc la structure de la matière en forme de vivant, et cette matière, qui est nourriture, en se dégradant dans les métabolismes, fournit, dans une sorte de réseau de courtes échelles, un accès à une autre forme d'énergie qui participe de la structuration de la matière dans un autre organisme.

¹⁸ D'Arcy. W. THOMPSON, *On Growth and Form*, Cambridge, Cambridge University Press, 1917.

¹⁹ T. KUHN, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Londres, The University of Chicago Press, 1962 ; Idem, *La structure des révolutions scientifiques*, trad. fr. L. MEYER, Paris, Éditions Flammarion, 2008.

²⁰ N. ELDRIDGE & S. J. GOULD, « Punctuated Equilibria : An Alternative to Phyletic Gradualism », in T. J. M. SCHOPF (éd.), *Models in paleobiology, Papers from a symposium, Washington, D.C., Nov. 1971*, San Francisco, Freeman, Cooper & Co, 1972, 82-115.

²¹ C. GOUPIL *et al.*, « Thermodynamics of metabolic energy conversion under muscle load », *New Journal of Physics* 21(2), 2019, 023021 ; C. GOUPIL & E. HERBERT, « Adapted or Adaptable : How to Manage Entropy Production ? », *Entropy* 22(1), 2020, 29.