



HAL
open science

Entropie, Neguentropie et Anti-entropie : le jeu des tensions pour penser le vivant

Marie Chollat-Namy, Giuseppe Longo

► To cite this version:

Marie Chollat-Namy, Giuseppe Longo. Entropie, Neguentropie et Anti-entropie : le jeu des tensions pour penser le vivant. ISTE Openscience, 2022. <hal-03933227>

HAL Id: hal-03933227

<https://ens.hal.science/hal-03933227v1>

Submitted on 10 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Entropie, Neguentropie et Anti-entropie : le jeu des tensions pour penser le vivant

Entropy, Negentropy and Anti-entropy : game of tensions to think the living

Marie CHOLLAT-NAMY¹, Giuseppe LONGO²

¹ PhD, Université Paris-Saclay, Paris, France, marichol@orange.fr

² CNRS et Ecole Normale Supérieure, Paris, France, giuseppe.longo@ens.fr

RÉSUMÉ. Des concepts différents, dérivés de celui d'entropie, mais qui s'y opposent, seront corrélés dans l'analyse de l'état vivant de la matière : ceux de neguentropie et d'anti-entropie. On discutera le rôle disruptif de l'entropie ainsi que son apport à la production de l'organisation du vivant (anti-entropie), dans l'espace et dans le temps. Cela nous permettra de parler de l'historicité du vivant et de définir un espace de viabilité où la diversité anti-entropique est obtenue par intégration/assimilation d'entropie locale (variation) dans les structures spatiales et les rythmes temporels du vivant. Le local co-construit ainsi le global, tout en constituant une contrainte de l'un sur l'autre, dans une tension au cœur de la phylogénèse et de l'ontogénèse.

ABSTRACT. Different concepts, derived from that of entropy, but which oppose it, will be correlated in the analysis of the living state of matter: those of negentropy and anti-entropy. We will discuss the disruptive role of entropy as well as its contribution to the production of the organization of life (anti-entropy), in space and time. This will allow us to talk about the historicity of the living and to define a space of viability where anti-entropic diversity is obtained by integration/assimilation of local entropy (variation) in the spatial structures and temporal rhythms of the living. The local thus co-constructs the global, while they constitute a constraint of one on the other, in a tension at the heart of phylogenesis and ontogenesis.

MOTS-CLÉS. Entropie, anti-entropie, neguentropie, historicité, évolution, spécificité, diversité, vivant

KEYWORDS. Entropy, anti-entropy, negentropy, historicity, evolution, specificity, diversity, living

1. Introduction

Un organisme vivant est sûrement un système loin de l'équilibre (il est traversé par un flot d'énergie et matière). Les notions qui proviennent de la physique des systèmes thermodynamiques loin de l'équilibre sont donc nécessaires à une approche à la globalité d'un organisme dans son écosystème, mais elles ne suffisent pas. Un être vivant s'auto-organise, il organise et s'organise dans son milieu et il modifie les deux (organisme et milieu) sans cesse, en se transformant dans un temps historique qui marque des changements profonds de tous les réseaux d'interactions externes et internes. L'historicité, comme nous la définirons, et la construction/reconstruction de son unité et de ses réseaux d'observables changeantes, sont aussi des notions nécessaires à la réflexion sur le vivant qui vont au-delà des conceptualisations propres à la physique.

Nous examinerons ces notions dans le cadre du jeu de tensions entre entropie et les deux concepts qui en proposent une négation possible, neguentropie et anti-entropie, en montrant comment la dialectique interne et externe aux systèmes évolutifs permet de saisir quelques aspects robustes des dynamiques biologiques, sans prétention aucune de définir le vivant.

2. Entropie, anti-entropie, historicité et diversité

2.1. Entropie vs anti-entropie

Le rôle de l'entropie dans les processus loin de l'équilibre, tels que les processus biologiques, a été largement reconnu par I. Prigogine (Nicolis et Prigogine 1977). Des écoles importantes dans de nombreux pays perpétuent cette tradition. Notons que la *néguentropie* (*negative entropy*), concept très répandu en physique depuis Schrödinger et Brillouin et dont on parlera, désigne habituellement l'entropie avec un signe négatif, modulo certains coefficients. Ainsi, en principe, lorsqu'elles se rencontrent, elles devraient s'additionner linéairement, et, si elles sont en quantité égale, donner 0. Par contre, nous nous concentrons ici sur l'analyse de l'entropie et de l' "anti-entropie" dans les organismes biologiques, en suivant (Bailly et Longo 2009; G Longo et Montévil 2014b; 2012). Pour une synthèse et des avancements récents, voir (Montévil 2021).

Avant (Bailly et Longo 2009), le mot anti-entropie avait été utilisé, apparemment, une seule fois et en physique, en tant que dual mathématique de l'entropie : son minimum coïncide avec le maximum d'entropie à l'équilibre, par exemple lors d'un mélange de gaz à température et volume constants (Duffin et Zener 1969), un contexte très différent de la biologie. Dans notre sens, l'anti-entropie est un nouveau concept et une nouvelle observable par rapport à la néguentropie, dont on parlera aussi, et au dual mathématique de l'entropie de (Duffin et Zener 1969) : typiquement, elle ne donne pas 0 si elle s'ajoute à une quantité égale d'entropie (comme le fait la néguentropie), et ne satisfait pas des équations minimax. L'anti-entropie fait référence à une approche quantitative et qualitative de l'"organisation biologique", sous les diverses formes de la morphogenèse, du remplacement, de la réparation biologiques et de la création de nouveauté. Dans ce dernier cas, on parlera de "production d'anti-entropie", comme proposé par (Montévil 2021). Le préfixe "anti-" est inspiré de la notion d'antimatière en physique, une notion très robuste. Cette notion trouve son origine, en physique quantique, lorsqu'on a observé que de la "matière" (un électron) pouvait soudainement disparaître et produire le double d'énergie, sous forme de rayon gamma (entre autres, une brisure de symétrie). Puis, certains physiciens, voir (Sakharov 1991), ont donné partiellement un sens à la solution négative de l'équation de Dirac et ont osé proposer que la matière avait rencontré son "anti-" (un anti-électron ou positron dans le cas de l'électron), ce qui a été largement confirmé par les expériences. Cette rencontre a lieu dans une singularité - un point (critique) de l'espace-temps mathématique. C'est une première différence fondamentale avec notre utilisation de l'anti-(entropie) en biologie : la "rencontre" de l'entropie et de l'anti-entropie a lieu dans un "état critique étendu", un intervalle de criticité composé d'une cascade spatio-temporelle de transitions critiques, état que nous avons proposé comme propre au vivant (G Longo et Montévil 2011; Bailly et Longo 2006). Au lieu donc de s'additionner linéairement, comme l'entropie et la néguentropie, ou se situer dans voire produire une singularité spatio-temporelle et énergétique, comme la matière et l'anti-matière, on considère l'entropie et l'anti-entropie coprésentes lors de la production/existence/reproduction d'un organisme vivant, qui, dans notre approche, est dans un état critique étendu très complexe (G Longo et Montévil 2011). Cet état de criticité étendue sera analysé dans ce texte comme le résultat de la tension entre entropie et anti-entropie, ainsi que de la tension entre entropie globale et entropie locale, qui, sous contraintes historiques et écosystémiques, produit l'anti-entropie.

Il n'est donc pas question d'opposer strictement entropie et anti-entropie : un objectif de cet article est aussi de rappeler comment l'entropie peut contribuer à l'ordre, par exemple par le rôle du mouvement brownien des molécules lors de l'expression génétique dans une cellule, par des phénomènes de diffusion de molécules fonctionnels au métabolisme, de diffusion de l'oxygène chez les insectes.... Du reste même en physique, la formation de dépôts minéraux ordonnés (concentrés), par exemple, est le résultat d'une diffusion de nature entropique, suivi par une concentration due au travail fait par la gravitation et les frictions (Montévil 2021).

En conclusion, l'entropie et l'anti-entropie sont des observables différentes, mais qui coexistent et s'alimentent réciproquement. Pourtant dans (Bailly et Longo 2009; G Longo et Montévil 2012), elles

ont été considérées dans la même dimension physique (de la même manière que l'énergie libre et l'énergie potentielle ont la même dimension, mais différent en tant qu'observables en physique). Au vu de la discussion dans cet article, il nous a paru plus robuste, conceptuellement, d'attribuer à l'anti-entropie une dimension propre (organisation et maintien de l'organisation biologique) et, quand elle contribue à la production de nouvelles observables (production d'anti-entropie), elle peut être aussi "créatrice de dimensions".

2.2. Neguentropie vs anti-entropie

Il est fait souvent et justement référence à Schrödinger pour avoir utilisé en premier, du moins en biologie, le notion de « negative entropy » (Schrödinger 1944). Donc si « $entropy = K \log D$ », où « D is a quantitative measure of the atomistic disorder of the body in question », écrit-il, « $negative\ entropy = -K \log D = K \log(1/D)$ » et « If D is a measure of disorder, its reciprocal, $1/D$, can be regarded as a direct measure of order » (K est une constante, de Boltzmann). Les organismes absorbent de l'environnement de l'ordre, insiste-t-il, dont, fondamentalement l'énergie organisée qui arrive du Soleil (les photons provenant du Soleil ont une entropie bien inférieure à ceux qui quittent la Terre, qui sont aussi plus froids). Ensuite, un abus a été commis et un jeu de mots s'est introduit : puisque Shannon définit l'information par un « $p \log p$ », où p sont des probabilités d'une suite de signes (une suite ordonnée de signes, un livre par Balzac par exemple, est peu probable), on a identifié l'entropie négative (devenue néguentropie) à l'information. Brillouin a contribué à cela, mais avec un peu d'humour, conscient de l'abus, en référence au démon magique de Maxwell, qui, sur la base d'une quantité minimale d'information sur les mouvements des particules dans un gaz, aurait pu inverser l'entropie¹. En fait, il y a entre les deux formules une constante dimensionnelle, le K de Boltzmann, ce qui n'est pas rien en physique (la dimension est ce qui différencie 1 mètre de 1 seconde !). Schrödinger n'a pas commis cet abus, car, ajoute-t-il dans une note au chapitre 6, par entropie négative on entend l'énergie libre (disponible pour faire du travail).

Pour éviter la confusion, dans (Bailly et Longo 2009; G Longo et Montévil 2012), nous avons donc appelée anti-entropie une mesure de la "complexité biologique", une complexité donnée dans un espace strictement tri-dimensionnel et dans un temps biologique dont on mentionnera la multi-dimensionnalité. Cette complexité n'est pas de l'information, ni de la néguentropie. Elle dépend en fait des dimensions spatiales - ce qui n'est absolument pas le cas pour l'information numérique, de Turing (élaboration de l'information) ou de Shannon (transmission de l'information), strictement unidimensionnelle, des suites de 0 et 1. (La mesure de) l'anti-entropie, dans sa première version de 2009, compte les plis, les structures fractales et leurs dimensions, le nombre des tissus, des nœuds dans les réseaux (neuronaux ...) etc d'un organisme ; l'anti-entropie est donc, en premier lieu, une mesure "anatomique" de la complexité d'un organisme. Appelons ici « anti-entropie *structurelle* » cette mesure de la complexité. Dans (G Longo et Montévil 2012), par contre, on a mis en évidence le rôle des symétries et de leur changements dans la production de l'anti-entropie, tout en considérant le rôle fonctionnel des organes mesurés ; bref, on a mieux spécifié ce qu'on appellera ici la « anti-entropie *fonctionnelle* », qui fait référence à l'organisation biologique fonctionnelle (et fonctionnant, dans le temps).

Le cancer donne un exemple de l'intérêt de cette distinction en deux formes d'anti-entropie. Comme il est dit dans (Longo et al. 2015) :

« Carcinogenesis illustrates how complexity and organization are not equivalent. For instance, in the mammary gland, precancerous lesions like ductal carcinoma in situ are more complex than normal ducts. This lesion appears as a partial occlusion of ducts which results

1 Le démon de Maxwell est un jeu inventif s'opposant de façon ludique à la vision dramatique de Boltzmann de la fin de l'Univers par l'état d'équilibre final entropique : un démon suffisamment intelligent et rapide pourrait diminuer l'entropie, en séparant les particules de gaz mélangées, en fonction d'une propriété mesurable de certaines d'entre elles, voir (Leff et Rex 1990). (Brillouin 1956) démontre que pour faire cela, le démon aurait dû effectuer une mesure impliquant une transformation d'énergie, donc une croissance de l'entropie, voir (Longo 2020a).

in more than a single lumen. Multiple lumena indicate higher measurable topological complexity. Moreover, the epithelium-stroma interface has a higher fractal dimension than that of their normal counterparts (Bizzarri et al. 2011). However, a cancerous tissue is less organized in the sense that it does not adequately perform the function of the normal tissue of origin. For example, a blocked duct interferes with excretory function. Additionally, cells within cancer tissues may not perform the functions of the cells within the normal tissue of origin. This combination of higher complexity and lower organization represents a true hallmark of cancer. »

La notion d'anti-entropie dans l'article avec (Bailly et Longo 2009) avait été proposée dans le but d'une application spécifique : une analyse mathématique de la « complexité » des organismes au cours de l'évolution, selon Darwin-Gould (Gould 1997). L'anti-entropie en fournit une mesure, plus précisément une mesure de la complexité structurelle (anatomique, disions-nous).

2.3. Entropie constructive et son intrication à l'anti-entropie

Dans ce cadre, il ne faut pas attribuer un rôle purement "destructeur" que l'on attribue parfois à la notion (physique) d'entropie, dont la néguentropie, en tant que "information" dans l'interprétation courante et assez "abusive" (question de dimension physique, disions-nous), serait la contrepartie "positive" ; on peut en spécifier un autre sens, mais alors il faut, justement, le spécifier. Typiquement, l'entropie dans le sens inspiré par la physique, qui est le nôtre, est produite par tous les processus irréversibles, y compris les processus qui produisent de l'anti-entropie, par exemple l'embryogenèse d'un multicellulaire – un moment de production maximale (vitesse) d'organisation biologique, mais aussi de transformation d'énergie et de production de désordre local – tout comme lors de chaque reproduction cellulaire. Plus en général, rappelons l'importance de la production persistante d'entropie pendant toutes les étapes de la vie. Nous nous référons ici à la production d'entropie interne à tout organisme, qui a "in primis" une nature physique, liée aux processus thermodynamiques, dont ceux qui contribuent au métabolisme, et à la transformation et l'échange de matière et d'énergie. Cependant, si la production d'entropie est due à tous les processus irréversibles, elle l'est aussi bien par les processus thermodynamiques que par la (re)construction permanente et irréversible de l'organisme lui-même. Cette activité de génération et de re-génération, y compris la réparation et le renouvellement, est typiquement biologique.

Notre cadre théorique vise donc à formaliser le fait que l'irréversibilité en biologie n'est pas seulement due aux effets thermodynamiques mais aussi à tous les processus qui produisent et maintiennent l'organisation biologique - c'est-à-dire qu'elle est due de manière concomitante à la production d'entropie et à son opposé dialectique, la production d'anti-entropie : l'embryogenèse, en fait, est un processus organisateur hautement irréversible "en soi". Par exemple, mais de manière générale, toute reproduction cellulaire n'est jamais une "reproduction" à l'identique : la non-identité des copies de l'ADN, des protéomes et des membranes et la diffusion inégale, non-symétrique, de l'énergie et de la matière, induisent un léger désordre et donc de l'entropie. Ainsi, toutes les formes de reproduction, au cœur de la morphogenèse biologique, produisent de l'entropie par des transformations nécessaires d'énergie, bien évidemment, mais aussi par l'irréversibilité propre et les brisures de symétries qui l'accompagnent, à commencer par la reproduction des cellules dans un organisme : ces brisures de symétrie, les différences entre deux cellules filles, sont des composantes essentielles de la différenciation et de la production de diversité, variabilité et adaptivité biologique présentes à toutes les échelles. Elles sont donc associées aussi à une *production* d'un (plus ou moins "important") désordre entropique. Pour le dire autrement, elles sont générées par une *intégration* d'entropie dans les processus biologiques, qui devient alors *fonctionnelle* à ses processus : une sorte d'organisation du désordre. Il s'agit donc de brisures de symétrie à la fois structurelles (répartition asymétrique des constituants entre les deux cellules/organismes) et temporelles (devenir/cycle de vie différent entre les deux cellules/organismes), les deux étant liés (ségrégation des vieux constituants dans la cellules qui va se différencier (Ouellet et Barral 2012)). Bref, l'anti-entropie produit de l'entropie et se "nourrit"

d'entropie – ce que l'on discutera longuement plus bas. Dans ce sens, il y a de l'entropie associée à (produite par) tous les processus irréversibles, y compris ceux constitutifs de l'organisation biologique, donc, dans notre approche, anti-entropiques.

D'ailleurs, dans (Bailly et Longo 2009; G Longo et Montévil 2012), on analyse la complexification évolutive du vivant comme "diffusion aléatoire asymétrique", en modélisant (Gould 1997) - et qui dit diffusion aléatoire, dit entropie. On peut donc voir l'entropie produite par l'évolution, voire par l'embryogenèse, comme une composante essentielle et constructive, de la mise en place de la diversité/différentiation et de l'organisation biologique, donc de la production d'anti-entropie. Les modèles de type diffusif que nous avons employé en biologie de l'évolution dans ces textes, relativement à l'anti-entropie en tant que complexité structurelle (bactérie, cellules eucaryotes, organismes multicellulaires), fonctionnent, de la même façon, à ceci près que l'espace sur lequel se fait la diffusion *est* cette complexité : on y analyse donc une dérive globale orientée vers plus de complexité évolutive (plus de tissus, de structures fractales ainsi que des réseaux cellulaires plus grands et interconnectés ... (G Longo et Montévil 2012; Bailly et Longo 2009)), mais des régressions locales sont possibles, comme pour tout mouvement aléatoire. Toutefois, la phylogenèse a une histoire et elle conserve en partie une "rétention" de cette histoire qui constitue des contraintes et crée des conditions nouvelles pour la suite (même si, là encore, des régressions locales sont possibles, par exemple la perte d'un organe comme les yeux du *cave fish*) ; ce processus qui intervient aussi dans le "changement d'espace de phase", c'est à dire la constitution de nouvelles observables et paramètres pertinents².

Bref, nous pensons que l'anti-entropie est plus pertinente que (et en tout cas différente de) la notion de néguentropie pour ce qui est organisé et historique (les organismes vivants, les structures sociales ...), quoique demandant encore beaucoup de développements car, du point de vue mathématique, nous avons d'abord creusé (Bailly et Longo 2009), la mesure qui se limite à l'anatomie de l'animal mort, l'anti-entropie structurelle. Par contre, par la notion de « closure of constraints » dans (Montévil et Mossio 2015), on spécifie ce que organisation biologique peut vouloir dire – c'est l'organisme avec ses fonctions. La notion d'anti-entropie fonctionnelle peut alors enrichir en ce sens la notion d'anti-entropie, comme mesure, en incluant les fonctions biologiques décrites par la structure des diagrammes dans (Montévil et Mossio 2015), voir aussi (Montévil 2021) et (Montévil 2022) où l'anti-entropie est le résultat singulier d'une histoire contribuant à l'organisation en traitant surtout la disruption de cette organisation.

Cela n'empêche pas que l'on puisse aussi accentuer l'aspect "dispersion", émiettement, baisse de l'énergie disponible pour faire du travail ... induit par l'entropie qui est un aspect inhérent et fondamental de la notion et de son origine en physique. Par exemple et pour mentionner une autre science historique, l'économie, Georgescu-Roegen a très bien fait (et il y a longtemps : (Georgescu-Roegen 1971)) de critiquer les analyses économiques basées sur les dynamiques à l'équilibre : tout système économique, une entreprise, un pays, la Terre entière ... est traversé par un flot d'énergie matière, essentiel à son fonctionnement économique, il est donc loin de l'équilibre. Il faut alors et "*au moins*" considérer des processus de type thermodynamique en économie et, inévitablement, l'entropie qu'ils permettent d'analyser, si on veut s'inspirer de la physique. Ces remarques permettent à Georgescu-Roegen de développer des réflexions pionnières sur les effets destructeurs sur l'écosystème d'une économie qui transforme de l'énergie sans contrôle, sans un débat démocratique qui puisse en canaliser les effets pervers, sans alternatives au « parcours optimal » dicté par les forces qui s'équilibreraient dans la concurrence parfaite. "*Au moins*", car dans l'analyse d'une science historique

² Une petite précision pour lever une possible ambiguïté sur la question des moyennes statistiques dans le cas diffusif : dans les mouvements aléatoires équiprobables, en général la moyenne des parcours à partir d'un centre et sans autre contrainte, reste nulle (compensation dans un sens ou dans l'autre puisque les probabilités dans un sens ou dans l'autre sont les mêmes), mais le paramètre pertinent est la racine de l'écart (qui fait intervenir les carrés). C'est ce qui se passe dans la diffusion à partir d'une source dans un milieu infini homogène. Dans (Bailly et Longo 2009; Longo, Montévil, et Pocheville 2012), les organismes peuvent se simplifier mais la complexification permet de créer des nouvelles niches, donc donne plus de possibilité de survie – en produisant en fait de l'anti-entropie.

comme l'économie et la biologie, il faut aller bien plus loin que la physique, même thermodynamique, voire, pour ce que sont les rapports entre biologie et physique, il faut "naturaliser" cette dernière en l'immergeant dans le contexte plus général des théories de l'état vivant de la matière ; celle-ci est une démarche ultérieure qui demande, in primis, la prise en compte de l'histoire, comme changement de l'espace des possibles (des "phases", dans le langage de la physique), voir (Longo 2020b; Koppl et al. 2015).

2.4. Spécificité biologique et historicité de l'anti-entropie

L'anti-entropie concerne donc et tout d'abord les formes et les fonctions biologiques, où le temps et les rythmes cycliques jouent un rôle essentiel. Notez en fait la différence avec les "formes" d'une dynamique physique, en particulier loin de l'équilibre : toutes les surfaces, les lignes (des flammes, des ouragans...) sont des géodésiques, données sous des conditions aux bords et dans le temps thermodynamique, sans contraintes historiques – une notion que nous allons spécifier. D'ailleurs, ces processus thermodynamiques se produisent dans un espace des phases (les observables et les paramètres pertinents) pré-donné à la dynamique. En fait, une bonne partie du travail théorique en physique consiste justement à inventer le bon espace des phases pour donner les équations, décrire des fonctions d'évolution etc.. Parfois, le nombre des dimensions de cet espace de "toutes les dynamiques possibles" peut changer, comme c'est le cas en physique statistique, mais les propriétés observables ne changent pas. Cela implique que tout processus thermodynamique a certes un temps irréversible, le temps du processus, dont certains phénomènes peuvent dépendre des instants précédents ("path dependence")(voir plus bas et (Stefanis et al. 2014; G Longo 2019)), mais il n'a pas d'histoire : les ouragans ou les flammes d'il y a quatre milliards d'années ou aujourd'hui s'analysent de la même façon, en fait ils tous sont du même "type". Le vivant a quelque peu changé dans ce temps, il a un temps historique, dont une composante essentielle est, justement, le changement de l'espaces des possibles : la permanente constitution de nouveaux phénotypes et organismes, les observables pertinentes de la biologie – avec, bien évidemment leurs paramètres pertinents. Avant la constitution de l'oreille interne ou des ailes des vertébrés, ces observables, leurs niches, les paramètres nécessaires à leur analyse n'ont pas lieu d'être.

De façon synthétique, l'histoire et son temps propre sont donnés par la co-constitution d'un espace des phases, dont la "non-conservation" est la fondamentale brisure de symétrie qui différencie la théorisation en biologie de celle de la physique. D'ailleurs, cette cascade de brisures de symétrie est ponctuée d'événements rares (G Longo 2019). L'évolution modifie l'espace des phases en tant qu'espace des possibles. L'addition des contraintes suffit-elle à justifier les formes du vivant (organes), qui sont loin d'être « optimales » au sens physique ? En effet, l'ADN est la trace physico-chimique d'une histoire, une *contrainte* fondamentale aux dynamiques macromoléculaires qui ont lieu à l'intérieur de toute cellule, il contribue à les "façonner" en canalisant leur dynamique, largement brownienne, et leur structure physico-chimique. Elle porte une trace (restructurée en permanence) des conditions initiales (par exemple et au moins, la double hélice et sa structure tridimensionnelle) et de toute l'histoire qui a produit sa composition chimique actuelle, dans chaque cellule. Comme toute contrainte en biologie, l'ADN est reconstruit en permanence par la dynamique même qu'il canalise (Montévil et Mossio 2015), tout comme la cellule, sa membrane, les microtubules, voire tout organites : ils canalisent/contraignent les processus qui les re-construisent en permanence – et cela dans des "temps caractéristiques" au delà desquels les contraintes, les flots et les structures peuvent changer, même radicalement. Cette notion de "closure of constraints" est étrangère à la physique mathématique et diffère radicalement de la notion de "conditions au contour", qui sont pré-données aux équations, mais aussi à la thermodynamique et à ses structures et cycles optimaux qui canalisent les flots d'énergie-matière. Par contre, dans une cellule, déjà le niveau physico-chimique présente des "fermetures de contraintes" propre au vivant : par exemple, des processus chimiques en réseau engendrent/renouvellent des enzymes qui rendent possible ces mêmes processus. La structure chimique ordonnée des enzymes canalise le flot d'entropie localement croissante, tout en contribuant à l'ordre global de la cellule.

D'ailleurs, la perspective thermodynamique ne permet pas de différencier les autres niveaux phénoménaux pertinents : cellule, tissu, organisme. Une telle approche est insuffisante même pour saisir le premier principe de Darwin : la reproduction avec variation, comme état par défaut (et premier principe) pour tout organisme, y compris multicellulaire, qui produit en même temps entropie et anti-entropie, même pour les cellules à l'intérieur d'un multicellulaire. Bref, la thermodynamique ne permet pas de *dériver* des principes physiques la propriété darwinienne fondamentale, la reproduction avec variation des organismes et ses conséquences car elle travaille à un niveau phénoménologique différent, le niveau moléculaire, voir plus bas sur les limites de la réduction en physique. C'est à dire, le principe darwinien est à appliquer à partir du niveau cellulaire et justifie également la forme historique des organes, où la reproduction avec variation (embryogenèse) est "première" et, ensuite, elle est "canalisée" par les contraintes biologiques et physiques (y compris thermodynamiques). La structure fractale des poumons, du systèmes vasculaire ... est la combinaison, d'une part, des forces physiques qui tendent à façonner l'organe vers des formes optimales pour l'échange d'énergie et matière dans les espaces pertinents, de l'autre du fait que ce qui est physiquement façonné sont des tissus produits par la reproduction cellulaire, toujours diverse et diversifiant. D'ailleurs, cette diversité de la structure fractale, qui est loin d'être "cristalline", est elle-même fonctionnelle à la résilience de l'organe. Bref, le "moteur premier" de l'engendrement des organes dans un organisme est la reproduction avec variation des cellules, avec donc le léger désordre qui lui est propre ; cette reproduction est canalisée par les forces physiques (ainsi que par le contexte biologique, bien évidemment).

On comprend alors un changement de regard : in primis, reproduction avec variation, ensuite (conceptuellement, non pas temporellement) contraintes physiques (et biologiques) – rien à voir avec les formes optimales, les géodésiques, façonnées seulement par des forces et des flots, de tout processus physique. Bref, l'embryogenèse, lieu maximale de la production de l'anti-entropie, est à analyser dans des termes qui diffèrent radicalement de ceux de la physique, voire de la construction des machines. Ces dernières se construisent en composant, en agaçant des composants élémentaires et simple, comme toute machine, voire tout objet inorganique ; au contraire, un organisme s'engendre par différenciation cellulaire en partant d'une seule cellule et en préservant à tout instant son unité/fonctionnalité organismique. Rien n'est optimal, mais (presque) tout est fonctionnel. Encore une fois, la tension entre production d'entropie et d'anti-entropie en est au cœur. Le léger désordre entropique dans toute reproduction cellulaire fait partie de la construction et la fonctionnalité de tout organe et organisme.

Enfin, un ouragan, une flamme... sont « spontanés » et « nécessaires », c'est à dire, ils se produisent "spontanément" et "nécessairement" sous certaines conditions aux bords pré-données - bien sûr, il peut y avoir des probabilités non-nulles qu'ils ne se produisent pas. Par contre, aucun organisme n'est spontané - sauf peut-être le totalement inconnu LUCA (Last Universal Common Ancestor), l'organisme originaire. D'ailleurs, à notre avis, mais il s'agit ici d'une provocation, presque aucun phénotype n'est nécessaire - peut-être un métabolisme minimale est nécessaire pour parler de vie ou... de LUCA ? Mais nous ne nous aventurons pas à parler de LUCA : trop souvent les spéculations sur l'origine de la vie ne font que forcer les (une ou deux) théories physiques vers des cas limites (boucles récursive dans le discret ou de contrôle dans le continu, transitions critiques, thermodynamique loin de l'équilibre...), sans franchir le pas d'une *transition théorique* vers des concepts propres au vivant, comme la physique a su le faire à plusieurs reprises au cours des derniers quatre siècles, en inventant des nouvelles observables, des théories radicalement nouvelles, des nouvelles mathématiques, même parfois suite à un simple changement d'échelle observée.

Le premier principe de Darwin, reproduction avec variation, et le "enablement" (rendre possible) introduisent une biologie de l'activité, de la motilité et du changement des *possibles* au cours d'une histoire, fort différente des théories de l'inerte, de leurs principes de conservation et de leurs symétries, dont la toute première, celle de la conservation de l'espaces des phases, en tant qu'espace des possibles. La physique explique le mouvement à partir de l'invariance (les principes de conservation, dont l'inertie) ; nous devons expliquer les stabilités (invariances) historicisées à partir de l'activité, voir

l'approche "relationnelle" dans (Montévil et Mossio 2020); (Marinucci 2022). Bref, le contexte des relations qui contraignent et rendent possibles ("enable") la reproduction avec variation et la motilité, constituent notre point de départ théorique.

3. L'anti-entropie comme résultat et origine du conflit dynamique des entropie locales et globales

3.1. Hétérogénéité et dualité conflictuelle de l'entropie

On parle généralement d'entropie lorsqu'il y a diffusion aléatoire, disions-nous. D'abord si l'on considère un simple phénomène de diffusion (simple homogénéisation d'une hétérogénéité au niveau macroscopique), il n'y a pas de forces extérieures appliquées ni d'interactions considérées si ce n'est le mouvement brownien des particules et leurs chocs. Pourtant il y a une tendance à l'homogénéisation et l'on distingue en quelque sorte une "force" qui gouverne la diffusion : le gradient de concentration. Cette "force", observable à une échelle supérieure à celle du mouvement d'une particule, est un *effet moyen* des marches aléatoires des particules dont la probabilité de présence dans l'ensemble tend à s'homogénéiser, d'où une dérive globale de la distribution dans le milieu³.

Ainsi, l'entropie est une tendance à la *variation* aléatoire à l'échelle locale et une tendance à l'*homogénéisation* (processus dirigé vers l'identique, dans une seule direction) ainsi qu'à la stabilité qui en découle, à l'échelle globale. Il faut bien mettre en évidence que ces phénomènes ne se conservent pas nécessairement à travers les échelles. En effet, la variation local, si elle est homogène, donne l'illusion de stabilité à l'échelle supérieure (nouvelle échelle) ; la stabilité est alors portée par l'homogénéisation de la variabilité locale. Par exemple, on considère que la température d'un gaz est stable quand l'agitation (moyenne des variations) est équivalente entre chaque molécule de ce gaz. Or, si la variation est généralement associé au désordre, l'homogénéisation et la stabilité sont généralement associées à l'ordre, il y a donc une forme « d'ordre » dans l'entropie, au niveau global⁴.

L'entropie fait toujours varier la différence dans le sens d'obtenir l'homogène, qui est unique du point de vue thermodynamique (un seul macro-état final possible). Or, l'entropie possède une différence intrinsèque entre son expression *locale* (variation qui produit ou amplifie les différences nécessaire à la diversité⁵) et *globale* (homogénéisation qui annihile les différences).

Faire varier cette différence intrinsèque à l'entropie afin de l'effacer revient à confronter ces deux expressions, locale et globale, c'est à dire faire jouer la tension entre ces deux aspects de l'entropie. La *variation de l'homogénéisation* donne des zones (hétérogènes) de stabilité à l'échelle inférieure, l'*homogénéisation de la variation* tend à réduire les possibilités de variation. De façon synthétique, que l'on articulera ci-dessous, la confrontation, ou tension, entre ces deux formes d'entropie opposées, variation locale (plurielle) et homogénéisation globale (unique), engendre des hétérogénéités. La particularité de chaque hétérogénéité (par rapport à l'homogène) provient de la variabilité (production du divers) par l'entropie locale. La stabilité d'une hétérogénéité, à chaque échelle, est due son

³ Le nombre de chocs étant d'autant plus élevé pour une espèce de particules données, qu'elle est plus abondante dans la région considérée : c'est ce qu'exprime l'aspect entropique croissant à partir de la fonction de partition - de nature statistique (Huang 1987).

⁴ Dans l'approche de Kolmogorof à la complexité algorithmique (Calude 2002), au contraire, une suite totalement désordonnée (entropie maximale) demande le maximum de complexité computationnelle, donc d'organisation, du programme qui l'engendre, globalement. Bref, pour l'information de Shannon (transmission), l'entropie maximale ne contient point d'information (elle n'est point complexe) ; au contraire, pour Kolmogorof (élaboration de l'information) une suite d'entropie maximale contient un maximum d'information, elle est maximale complexe (il faut un programme aussi long que la suite car il n'y a aucune régularité qui permette de le simplifier). Il n'y a pas de contradiction, juste l'orthogonalité de deux théories différentes (transmission vs élaboration de l'information, voir (Calude et Longo 2016).

⁵ Par exemple, par la diversité entropique/aléatoire de la répartition du protéome résultant de la reproduction cellulaire.

homogénéité interne (maintient de ce qui est commun), par exemple par le partage du même ADN par les cellules d'un organisme.

L'hétérogénéité naît alors de *la double contrainte, dans les deux sens*, en temps et en espace, *entre l'entropie locale et l'entropie globale* à chaque échelle.

Typiquement, tout comme la diversité des protéomes, les mutations aléatoires et le réarrangement allélique sont un des phénomènes locaux, de type entropique, qui contribuent à l'hétérogénéité. Sous contraintes écosystémiques et historiques, cela correspond à la production d'anti-entropie mentionnée plus haut. A cet égard, il faut citer aussi le rôle de la « plasticité développementale » pour la construction des dynamiques évolutives, mis en évidence dans (West-Eberhard 2003). Dans l'analyse de West-Eberhard, un changement dans les contraintes développementales, où le développement concerne toute la vie d'un organisme, peut modifier de façon durable le phénotype, en excluant certaines des traits, en favorisant d'autres. Cette production de diversité est due à la plasticité locale du développement : dans ses nombreux exemples, la production de diversité des traits chez quelques individus précède, quand elle est viable, la spéciation. La plasticité développementale est donc un cas typique de la tension local/global à différentes échelles qui produit (des variations de) l'anti-entropie : de l'individu, à partir de l'embryogenèse, jusqu'à la spéciation.

Précisons ces idées par un exemple dans (West-Eberhard 2003), l'éléphant nain qui a peuplé les îles méditerranéennes au cours de la préhistoire. L'initiation du nouveau phénotype (taille réduite) s'est accomplie à l'occasion d'une famine qui a conduit à une atrophie des éléphants. Les grands éléphants sont exclus (négativement sélectionnés) ; les éléphants de petite taille et leurs nouveau-nés survivent à l'accouchement seulement quand le petit est de petite taille ; la durée de la nouvelle contrainte environnementale canalise l'évolution de ces éléphants au moins autant qu'elle dure.

« Undersized and “starvation” forms are exceedingly common in nature, even though disadvantageous, because developing individuals often cannot escape environmental variation in food supply. As a result, evolved specializations to small size, such as nonfighting morphologies and behaviors of small males, and other striking size-associated adaptations are common in nature.» (West-Eberhard 2005).

Dans cette approche, le phénotype est sélectionné en premier, localement, au niveau des individus, et la sélection sur les gènes opère de façon indirecte, si elle a lieu. C'est-à-dire, des facteurs non génétiques (l'atrophie forcée par l'environnement des éléphants, par exemple) peuvent être à l'origine d'une variation phénotypique qui est alors sélectionnée positivement (la petite taille) et, en perdurant ces facteurs, la variation devient un phénomène global, un changement dans l'espèce. Comme le dit West-Eberhard, les gènes peuvent alors être des « followers, not promoters » du changement : La contrainte globale canalise l'expression des gènes voir même la dynamique de l'ADN.

Dans l'autre sens, en suivant (Montévil et Mossio 2015), l'ADN est une des contraintes du développement : il est la trace physico-chimique de l'histoire évolutive, utilisée par les flots moléculaires dans la cellule pour produire des protéines. Elle est une contrainte interne à la cellule différemment utilisée par chaque cellule selon le contexte, à partir de la position relative dans un embryon/organisme, dans les tissus et du tissu etc... Quand des contraintes changent, internes ou externes, la résilience du développement (la plasticité développementale) rend possible (« enables »), voire favorise, ou exclue, l'une ou l'autre des variantes due à cette plasticité. Bref, le phénomène local, la plasticité, en tant que la capacité d'un organisme à réagir au changement d'une contrainte interne ou environnementale, par un changement de forme, d'état, de rythmes dans le développement (voire la forme de surface et de profondeur du « three-spined stickleback », plus bas), peut induire un changement dans l'histoire globale d'une espèce ou d'une population par cette tension qui s'opère au niveau local entre contraintes et flots. En fait, les contraintes canalisent les flots entropiques qui les rendent possible et nourrissent l'anti-entropie, car les changements locaux des contraintes et des flots peuvent modifier les formes et fonctions à tous les niveaux, voire produire de l'anti-entropie. Et cela de

façon adaptative ou non, réversible ou non, associée ou non à différents phénotypes (par exemple, le criquet pèlerin présente une forme grégaire, à ailes longues et corps coloré, et une forme solitaire, à ailes courtes et couleur uniforme – des variations que l'on retrouve, au moins partiellement, aussi dans le développement). Dans cette vision, les modifications de l'ADN-contrainte peuvent bien être à l'origine du changement, mais, West-Eberhard insiste,

“the origin of species differences, and of novel phenotypes in general, involves the reorganization of ancestral phenotypes (developmental recombination) followed by the genetic accommodation of change”.

Par exemple, les formes des feuilles de la *Monstera dubia* “have been developmentally duplicated, deleted, and recombined in a multitude of ways during the evolution of the genus *Monstera*, giving rise to a variety of species-specific ontogenies” (West-Eberhard 2005).

Bref, l'origine d'un nouveau phénotype peut être due à des changements des dynamiques moléculaires et/ou de recombinaison de phénotypes ancestraux : dans les deux cas, ils s'agit de variations locales de l'ordre existant, qui accentuent les différences entre zones d'homogénéisation diverses et produisent de l'hétérogénéité à diverses échelles. Celles-ci peuvent éventuellement se stabiliser, ou être éliminées par les contraintes à différentes échelles et leurs interactions. Qu'elles soient engendrées par des mutations ou des facteurs environnementaux changeants, qu'il est légitime de considérer aléatoires, la pression sélective (négative) est globalement homogénéisante par exclusion de l'incompatible.

Pour nous résumer, l'hétérogénéité est le résultat et fait *le lien* entre les manifestations globales et locales de l'entropie tout en créant de nouvelles échelles définissables par la présence même de ces hétérogénéités et de leurs différences (par exemple la création des organismes multicellulaires au cours de l'évolution, de niches écosystémiques enchevêtrées).

Un déséquilibre dans la tension entropie locale/globale entraîne une transition de phase/brisure de symétrie comme changement de rapport de tension/contrainte entre entropie globale et locale. Le tension finie par atteindre un minimum local, une stabilité plus ou moins étendue permettant l'existence d'hétérogénéités qui sont des structures relativement stables, à la fois matérielles et temporelles. L'équilibre des tensions/contraintes entre entropies locale/globale donne de la stabilité et de la prédictibilité aux lois régissant la matière inerte à *chaque échelle*, où les brisures de symétrie sont rares, et ont lieu dans des espaces des phases pré-donnés. Différemment de la biologie (non moléculaire) dont les analyses doivent traverser toutes les échelles pertinentes (molécules, cellules, tissu, organe, organisme ... espèce), les théories physiques s'organisent selon les échelles et sont irréductibles : pas de réduction des échelles classiques/relativistes à la microphysique; pas de réduction de l'hydrodynamique des fluides incompressibles à la physique statistique ni à la mécanique quantique (Chibbaro, Rondoni, et Vulpiani 2014); (G Longo 2016). La recherche vise plutôt à des “unifications”, c'est-à-dire à construire une troisième théorie qui unifie/corrèle celles existantes aux différentes échelles. Dans chaque cadre théorique de l'inerte, les brisures de symétries ne s'enchaînent pas (ou peu, comme dans les avalanches, les tas de sables (Kauffman 2003), qui sont des transitions critiques (Laguës et Lesne 2003)), et la symétrie fondamentale, la stabilité/conservation dans chaque théorie de l'espaces des observables et des paramètres pertinents, l'espace des phases, est préservée. A noter que, en physique, une des difficultés des unifications est aussi la construction d'un espace des phases commun aux théories à unifier. Le déficit du biologique est plutôt l'absence d'un tel espace pré-donné de la théorie dont le changement est une composante essentielle de l'historicité et de la diversité du vivant.

3.2. Anti-Entropie comme organisation dynamique de la tension entropie locale/globale et la production d'histoire et de diversité

Dans le vivant, disions-nous, entropie globale et locale sont en tension entre *homogénéisation par le global*, c'est à dire par l'organisation à l'échelle supérieure, et *hétérogénéisation par le local* (variabilité interne) où l'un *contraint* l'autre. Par exemple, l'écosystème exerce une pression de sélection environnementale relativement stable par rapport à la vie d'un organisme, en même temps chaque nouvel organisme apporte son « lot de variation », à la fois par rapport aux autres organismes de la même espèce, par rapport sa viabilité écosystémique. L'écosystème exerce alors une pression de sélection qui aura tendance à éliminer ces variations et homogénéiser l'espèce, en excluant l'incompatible. Cependant, cette tension n'est pas à l'équilibre, elle est encore moins "optimale", ou "parfaite", au contraire, il y a un décalage, une non-identité des oppositions, un certain « relâchement » des contraintes, qui génère une *dynamique continuellement réorganisée*. Celle-ci est *constituée de brisures de symétrie en cascade liant différentes échelles d'organisation* et permettant à ses échelles d'organisation d'exister. Typiquement, des "variantes" des organismes se produisent, dont dérivent des populations diverses possibles, et peuvent donner lieu à des spéciations, plus ou moins stables. Ce phénomène, à la fois *dynamique de la structure* (faite de la tension entropie globale/locale) et *structure de la dynamique*, se manifeste et contribue à l'anti-entropie propre au vivant.

L'anti-entropie émerge et évolue donc entre deux dynamiques contradictoires : se rapprocher de l'équilibre entropique global, une « optimalité » tendancielle (stabilisation par les liens/relations entre hétérogénéités plurielles et diverses), tout en s'en éloignant par la variation locale (poussant à la diversification entre hétérogénéité). Elle maintient son propre déséquilibre, sorte de va-et-vient entre ces deux tendances attractives mais destructives à terme (voir plus loin au sujet de la disruption). La production d'anti-entropie se situerait alors dans la dialectique/tension, toujours imparfaite, entre l'entropie locale (proche du flux du présent) et l'entropie globale (portant l'inertie, les rétentions du passé).

Cette tension se retrouve également entre la discontinuité hétérogénéisante du local (mort cellulaire et mort de l'individu) et la continuité homogénéisante (phylogénétique) du global (perpétuation de la vie de l'individu pluricellulaire et perpétuation de l'espèce par la stabilité relative de l'ADN, de la cellule germinale transmise, de la niche), ainsi que entre la tendance à la conservation, la reproduction/répétition à l'identique (par la stabilité du global) et l'évolution, la divergence (par variabilité du local). Cela rappelle la notion de « conflit de l'identité dans la différence » de Merleau Ponty. Bien évidemment des instabilités globales peuvent avoir lieu (l'arrivée d'une météorite, des activités volcaniques) ; alors les rétentions locales (typiquement, l'ADN, la structure des cellules, des organismes existant) joueront un rôle stabilisant, voire de continuité, autant que possible, de contraintes historiques, dans la tension dialectique avec les nouveaux contextes écosystémiques.

L'anti-entropie, propre à la matérialité du vivant, serait alors l'unification instable en continuuel devenir d'une pluralité/hétérogénéité de parties, elles mêmes en devenir diverse, et entretenant des relations d'interdépendances trans-échelles.

3.3. Diagrammes entropiques et espaces de viabilité

Esquissons maintenant une courbe de « potentialité » anti-entropique (en tant que possibilité d'émergence d'hétérogénéité par des brisures de symétries)(Fig 1), décrite ci-dessous entre la stabilité parfaite et la variation totale sans contraintes, deux extrêmes non propices à l'émergence d'hétérogénéité. Ce passage de la stabilité parfaite à la variabilité maximale, est décrit dans les dimensions : locale en horizontal, globale en vertical. Dans les cas examinés plus haut des travaux de West-Eberhard, la variation développementale est de nature locale relativement à la possible spéciation qui serait de nature globale. Ces variations sont de nature matériel, de forme, de structure... que l'on considère de nature « *spatiale* ».

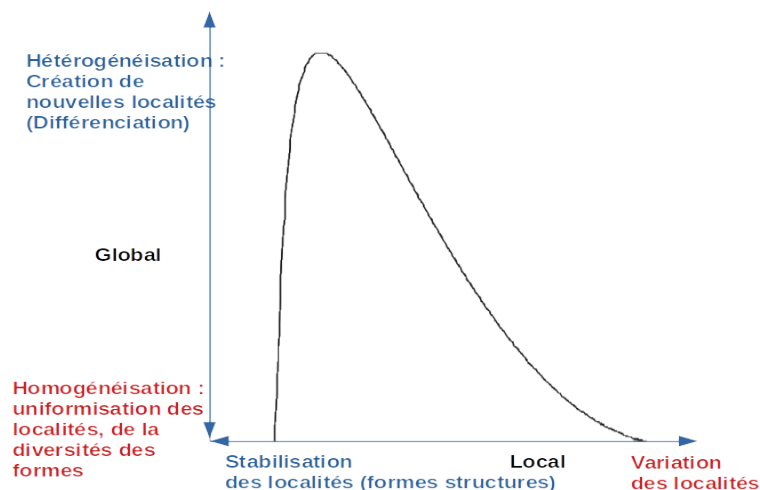


Figure 1. Courbe de potentialité anti-entropique selon les échelles d'espace matériel (globale et locale)

L'aspect de demi-gaussienne de la courbe indique qu'il est important d'avoir un certain degré de stabilité pour le maintien de l'hétérogénéité, mais il faut aussi de la variation pour entretenir la diversité de l'hétérogénéité (en permettant l'apparition de nouvelles hétérogénéités) laquelle autrement a tendance à s'homogénéiser. On retrouve cet aspect dans la notion de reproduction avec variation, moteur de l'évolution et de l'ontogenèse (Soto et al. 2016), où la part de reproduction essentiellement similaire est plus grande que la part qui varie (quelques mutations dans le cas de la méiose, répartition asymétrique de certains constituants dans le cas de la mitose), mais la combinaison des deux est nécessaire à la vie.

Bref, homogénéisation et variation maximales sont comme deux « attracteurs » entropiques mais à différentes échelles, respectivement globale et locale. L'extrême homogénéisation stable (vers le (0,0) des axes cartésiens) peut s'apparenter à la structure d'un cristal, l'extrême homogénéisation des variations peut s'apparenter à la structure d'un gaz à l'équilibre entropique (absence de structure).

La courbe plus haut est définissable à la fois en terme d'espace (Fig 1) et de temps (Fig 2). Comme expliqué dans (West-Eberhard 2005),

“also heterochrony (altered timing in ontogeny) in the expression of adaptive traits that previously evolved may contribute to speciation. For example, the three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) presents both a “limnetic” and a “bentic” form. Their ancestral population occupies both of the habitats observed in the descendent species pairs and exhibits both phenotypes at different times during its life cycle, a pattern that suggests that the different recurrent forms may have originated not by parallel evolution but by altered timing (heterochrony) in the expression of those traits”.

Dans la nouvelle courbe, alors, à l'hétérogénéisation on substitue l'hétérochronie, à la variation des localités on substitue la variations des hétérochronies et à l'homogénéisation on substitue la synchronisation (la tendance aux “fine tuning” excessif des rythmes par exemple) :

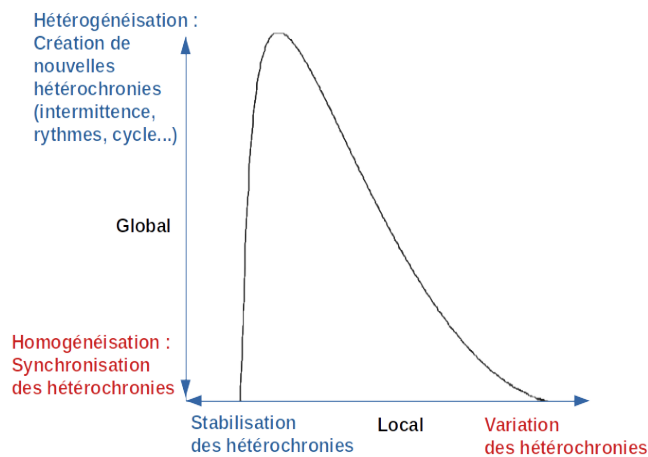


Figure 2. Courbe de potentialité anti-entropique selon les échelles de temps (globale/locale)

L'exemple par West-Eberhard plus haut, le poisson *Gasterosteus aculeatus*, fait référence à une hétérochronie productrice d'anti-entropie : une spéciation donnant lieu à une nouveauté évolutive de type temporelle. Dans (Montévil 2022) au contraire, on présente un cas de dé-synchronisation entropique : la synchronisation évolutive entre angio-spermes et pollinisateurs est "disrupté" par le changement climatique, on perd la spécificité historique et on tombe dans une situation plus générique – moins spécifiée par une histoire. La dé-synchronisation/variation des rythmes (la perte de leur "fine tuning" évolutif) produit trop rapidement de l'entropie ce qui détruit l'anti-entropie et conduit à l'effondrement des populations.

Pour nous résumer :

- L'homogénéisation comprend l'uniformisation (homogénéisation des formes dans l'espace, figure 1) ainsi que la synchronisation (homogénéisation des hétérochronies dans le temps, figure 2) .
- La stabilité se retrouve à la fois dans la *stabilité de la forme, des localités* (hétérogénéité d'espace qui se conserve dans un intervalle de temps, qui serait donc homogène localement) et la *répétition similaire d'un rythme/cycle/intermittence* ; on a donc une hétérogénéité de temps qui se conserve dans un espace, qui serait alors homogène localement (par exemple, le cycle du sommeil, rythme de contraction d'une cellule cardiaque, temps de renouvellement d'une cellule de peau...)
- Les hétérogénéités sont définissables par leur espace propre, leur forme/structure (hétérogénéité d'espace) et par leur temps propre, leur hétérochronie/dynamique (hétérogénéité de temps); elles nécessitent une certaine stabilité de leurs « bords/limites » pour être définies : des frontières de localités (en espace) et des durées d'intermittences/rythmes qui se réitèrent (en temps, voir (Longo et Montévil 2014a)). Dans le vivant, chaque hétérogénéité d'espace (localité) est soutenue par des rythmes/cycles internes (par exemple, le corps des mammifères est soutenu par les cycles de la respiration, de la circulation sanguine, du sommeil, de la nutrition) et chaque hétérogénéité de temps (rythme propre) est soutenue par des structures spatiales/matérielles (le rythme cardiaque est soutenu/produit par le cœur).
- La variation advient autant en terme de changement de forme et de structure (variation dans l'espace ; par exemple : mutation, changement de conformation protéique, déformation cellulaire ou de tissus et d'organe) qu'en terme de changement de dynamique temporelle, en vitesse/fréquence (variation dans le temps ; par exemple : ralentissement de certaines activités métaboliques lors de la division cellulaire, accélération du rythme cardiaque...). La variation se manifeste par rapport à une « norme » créée par le système vivant au cours de son histoire.

Dans les deux figures plus haut, les axes font référence à l'échelle à laquelle on décrit le phénomène. La notion de global correspond à un *ensemble* de localités et leurs cycles temporels. La variation locale est ce qui se passe pour *une* localité et son cycle. La variation est ce qui tend à détruire une hétérogénéité à son échelle tout en ouvrant des possibilités d'une nouvelle hétérogénéité. L'homogénéisation tend à maintenir stable ce qu'il y a de semblable dans un ensemble d'hétérogénéités, à réduire les différences et à créer de l'unité par des relations. L'indépendance des deux *représentations* spatiale et temporelle plus haut (ce qui n'empêche pas des corrélations causales), permet d'effectuer une rotation des axes dans celle du temps, la figure à droite :

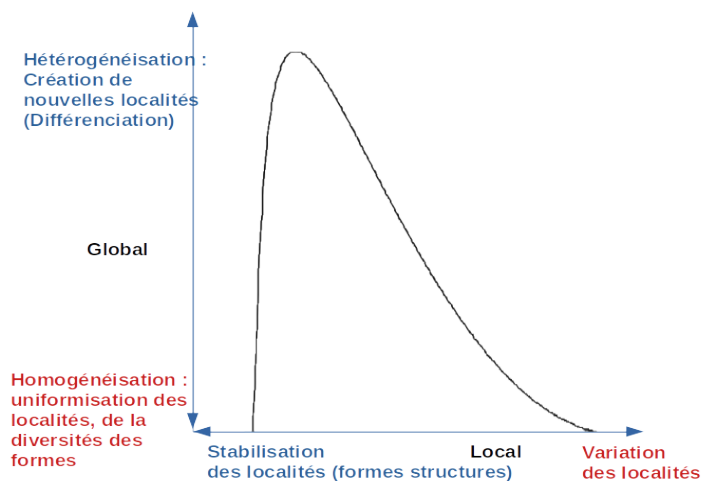


Figure 1. Courbe de potentialité anti-entropique selon les échelles d'espace (globale et locale)

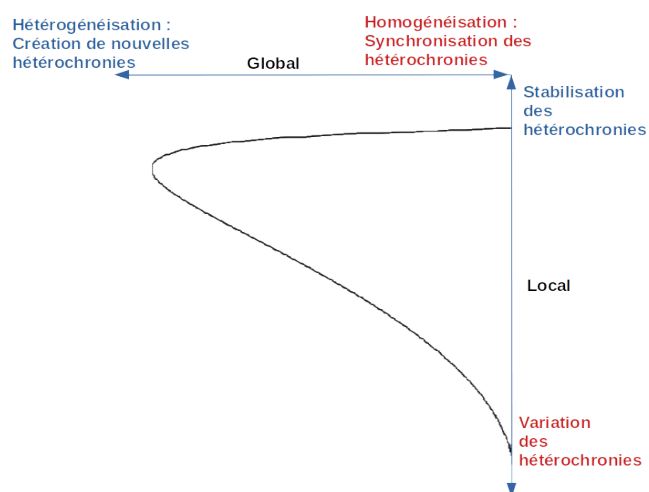


Figure 2. Courbe de potentialité anti-entropique selon les échelles de temps (globale/locale)

La superposition des deux diagrammes (de l'espace et du temps)(Fig 1 et 2) met en évidence une zone de viabilité (en bleu) à l'intersection des courbes, que l'on peut définir comme zone de maintien des hétérogénéités anti-entropiques (Fig 3).

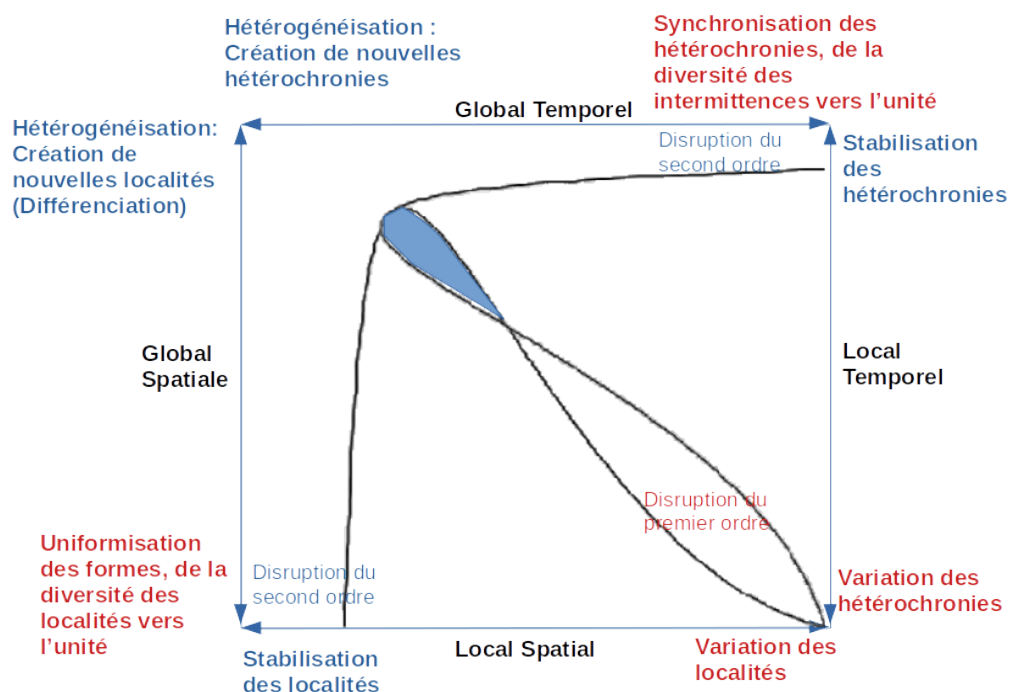


Figure 3. Superposition des courbes de potentialités anti-entropiques reliant les échelles globale/locale de temps et d'espace

L'apparition de nouvelles hétérogénéités fonctionnelles correspond à la production d'anti-entropie, et se fait par élargissement des contours de cette zone, alternativement du côté de la variation (désorganisation) puis du côté de la stabilité (réorganisation), l'un ne va pas sans l'autre. En effet,

lorsqu'un système vivant s'ouvre à la variation, cela tend à le changer en effaçant les composantes de son passé, matérialisées par ses hétérogénéités, qui le conditionnent. Cependant, ce passé est une source à la fois de stabilité du système et de potentialité d'invention, par exemple par la "réorganisation développementale" à la West-Eberhard. Ainsi trop de variation (sans prise en compte/restauration/maintient du passé, comme dans un gaz) limite en réalité la capacité de variation à une plage restreinte et déterminée (espace des phases pré-donné,) sans possibilité de réelle nouveauté évolutive (création de singularité imprévisible, un nouveau phénotype, un nouvel organisme, typiquement, dans une nouvelle niche). Cela conduit à l'homogénéisation comme destruction de l'histoire sans construction et restauration (voir plus partie 3.5 au sujet de la disruption). Au contraire, si le peu de variation est stabilisé car fonctionnelle, ou, du moins, dysfonctionnelle par rapport à l'existant mais viable, cela produit de l'hétérogénéité anti-entropique, c'est à dire de la diversité (de nouvelles structures en terme d'espace) et de l'historicité (de nouvelles dynamiques en terme de temps) : le système vivant a alors évolué.

3.4. Stabilisation et variation, conservation et divergence

Dans notre perspective, *la production d'anti-entropie, en tant qu'apparition de nouveauté par stabilisation de la variation, a toujours une origine en partie entropique* (elle nécessite l'intervention de l'entropie local sous forme de variation/perturbation). Considérons par exemple une des grandes transitions évolutives : la formation des cellules eucaryotes par symbiose de bactéries et d'archées, en particulier grâce à celles qui vont former les mitochondries (Martin, Garg, et Zimorski 2015). L'invagination de la bactérie dans une archée (donnant la double membrane des mitochondries) a certainement représenté une grande perturbation entropique pour l'archée hôte, voire pour les deux (peut-être était-ce une forme de parasitisme). Par co-évolution, leur relation serait devenue symbiotique, une nouvelle situation de viabilité parmi, très probablement, maintes faillites de cet "accident" évolutif, une disruption énorme à l'échelle d'une bactérie et d'une archée. Voilà un cas typique d'hétérogenèse comme production de diversité par la rencontre de diversités, voire le croisement de parcours évolutifs divers (« developmental recombination » dit (West-Eberhard 2005)). Mathématiquement, cela a été élégamment décrit comme croisement d'opérateurs différentiels différents, qui engendre une trajectoire nouvelle, dans un nouvel espace des phases (Sarti, Citti, et Piotrowski 2019).

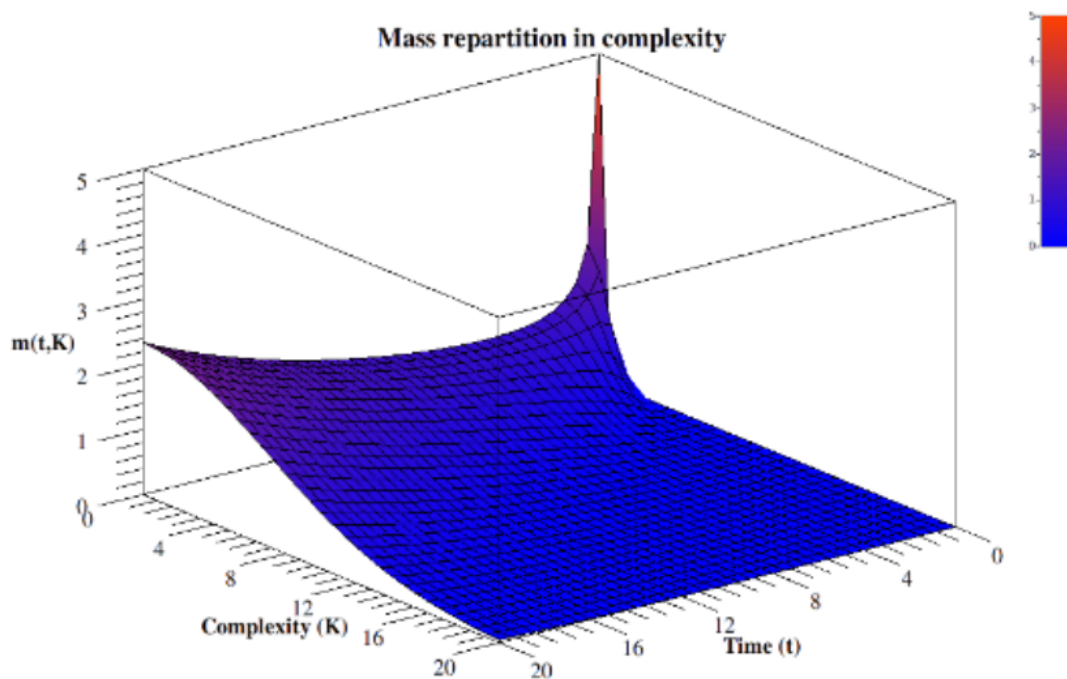
En général, bien évidemment, aucune variation n'est directement anti-entropique, sauf peut-être lorsque l'on peut se projeter dans le futur (par protension, anticipation suite à un apprentissage), ce que font les animaux et surtout les humains. Son déploiement/effet/impact dans le temps et dans l'espace sur l'organisation anti-entropique existante provoque des brisures de symétries successives, c'est à dire des processus de désorganisation engendrant des réorganisations/reconfigurations. Pensons, encore une fois, à la reproduction cellulaire : la composante aléatoire/entropique de la distribution du protéome, de la reconstruction de l'ADN, contribue à la production anti-entropique de la nouvelle organisation, dans sa diversité. Bref, si les réorganisations rendent possible le maintien de cette nouvelle organisation (acquière de la stabilité), la variation entropique a alors été transformé en nouveauté fonctionnelle anti-entropique ; en particulier, elle est à l'origine de la diversité évolutive, aux différents niveaux d'organisation biologique (reproduction cellulaire et des multicellulaires), mais elle contribue aussi à la différenciation tissulaire au cours de l'embryogenèse – par la forte sensibilité aux conditions au contour (aux pressions, aux flots bio-chimiques...) lors de cette "transition critique". Ainsi, c'est comme si, disions-nous, l'anti-entropie se « nourrissait » d'entropie⁶. La variabilité entropique, qui génère des « défauts » par rapport à la norme d'un système vivant, est nécessaire à son évolution et donc à l'évolution sous toutes ses formes (la différenciation cellulaire, le développement embryonnaire,

⁶ Les notions de « flux du divers » et de « stases » chez Nietzsche pourrait être associées, respectivement, à celle d'entropie locale et d'hétérogénéité. Selon lui « le flux détruit tendanciellement les moyens mis en œuvre par la vie pour s'en protéger » (stase) mais ce flux nourrit la vie, par « incorporation » lui permettant de se maintenir et de faire évoluer ses stases. La variabilité du flux et la stabilité des stases sont alors en « tension tragique » (Stiegler 2021).

l'évolution des espèces, l'évolution des écosystèmes, l'individuation au sens de Simondon...), c'est ce que le philosophe Bernard Stiegler appelait « le défaut qu'il faut ».

A noter que la nouvelle organisation n'est pas forcément plus complexe que la précédente dont elle provient, il n'y a pas de finalisme téléologique du vivant vers toujours plus de complexité, toutefois une complexification peut permettre l'invention d'une niche (écosystémique) nouvelle, auquel cas elle a donc plus de chance de survivre, voir aussi (Cazzolla Gatti et al. 2018). En développant l'idée dans (Gould 1997) mentionnée plus haut, rappelons que cela peut se "modéliser" comme diffusion asymétrique, donc comme phénomène globalement entropique : une diffusion aléatoire de la biomasse sur la complexité dit Gould (sur l'anti-entropie, en tant que quantification de la complexité, dans notre modèle), mais sous une contrainte : l'asymétrie par rapport à une valeur minimale de complexité, celle de la bactérie par exemple. La diffusion démarre par l' "explosion" reproductive originaire des bactéries/archées, si on prend ces organismes comme le lieu de la complexité minimale pour notre mesure. La biomasse diffuse alors dans l'espace, le temps, mais aussi, dans (Bailly et Longo 2009; G Longo et Montévil 2012), dans la dimension de l'anti-entropie (Complexity, dans le diagramme plus bas (Fig 4) de (Longo et Montévil, 2014c). Reprenons donc le diagramme de ces articles concernant la diffusion de la biomasse, $m(t,K)$, en fonction du/dans le temps (t) et en fonction de la/sur la complexité (K). Le diagramme est une description qualitative qui justifie une croissance de la complexité par simple diffusion asymétrique, selon le schéma empirique proposé dans (Gould 1997). Cette complexification n'est due à aucun finalisme, mais elle est une tendance entropique (diffusive) à l'intérieur de laquelle a lieu la tension global/local sur laquelle nous insistons, lors de la diffusion de la biomasse par reproduction avec variation : la formation d'un nouveau phénotype/organisme et, donc, d'une nouvelle niche (locale) qui rend possible la complexification ("enables it", (G Longo, Montévil, et Kauffman 2012)). Bref, les organismes qui se complexifient ont plus de chance de survie, en construisant une nouvelle niche, que ceux qui se simplifient (varient vers la gauche, le 0, de l'axe de la Complexity), car ils ont plus de chance de se trouver dans des niches déjà occupées. On a donc un phénomène entropique (global) producteur d'anti-entropie.

Figure 4. Complexité (Longo et Montévil, 2014c)



Les *relations* entre systèmes vivants sont *créatrices d'échelles supérieures* de temps (nouveaux rythmes, e.g. respiration et cardiaque chez les grands vertébrés) et d'espace (nouvelles formes, e.g. système cardio-vasculaire) à partir d'ensemble hétérogène d'échelles inférieures (rythmes métaboliques, cellules musculaires, cellules épithéliales...), mais sans les annihiler, leur permettant au contraire d'approfondir leur différence (par variation), toute en renforçant par stabilisation ce qui leur est commun. Ce qui est mise en commun par la relation forme des nouveaux espaces où la variabilité de l'entropie peut quand même intervenir, dans une moindre mesure, et contribuer à la diversification de la relation par co-évolution (les diversités de : ligand/récepteur, relations entre différents tissu au sein d'un même organe, relation symbiotique, relation proie/prédateur...). Le passage à l'échelle se fait à partir d'une certaine qualité d'hétérogénéité et de relation entre ces hétérogénéités (par exemple la différenciation locale cellulaire et tissulaire au cours de l'embryogenèse et la croissance globale du type/nombre de tissus au cours de l'évolution ; leurs corrélations). Cette échelle, à la fois de temps et d'espace, est qualifiée d'échelle d'organisation. Il y a donc diversification des échelles d'organisation inférieures en même temps qu'augmentation du nombre d'échelles par organisme. Dans ce sens, la pluricellularité d'un organisme est rendue possible par la différenciation des cellules qui le composent, où les caractéristiques des relations entre ses cellules différenciées rendent compte de leur fonctionnalité. Leur différenciation est conditionnée par la création de « niches » rendue possible par l'état pluricellulaire. A l'échelle encore supérieure, les organismes pluricellulaires, par leurs relations entre individus et populations et avec leur environnement, créent des niches écosystémiques qui les conditionnent à leur tour. Et cela sans oublier la nature symbiotique de tout organisme multicellulaire, habité par des énormes quantités/colonies de micro-organismes.

Pour synthétiser : en terme de temps, on retrouve le continuum de l'évolution du vivant et la discontinuité de la vie des organismes; en terme d'espace, on retrouve le continuum de l'organisation (un organisme contient plusieurs échelles d'organisation emboîtées et inséparables), la discontinuité des échelles d'organisation (bactérie, eucaryote, organisme pluricellulaire, groupe d'individu, écosystème...).

Ce décalage (cette “non coïncidence” comme dirait Miguel Benasayag dans (Benasayag et Cany 2021) en échelle du lien entre l'espace et le temps, lien maintenue par des boucles/clôtures de contraintes trans-échelles, contribue à l'élargissement de la criticité, qui est entretenue par ces boucles : ces boucles d'interaction entre échelles rendent possible une criticité non décrite en physique, l'état criticité étendu propre au vivant (G Longo et Montévil 2013), en lui donnant une stabilité relative viable, elles le canalisent.

La particularité de l'anti-entropie est de pouvoir être le résultat d'une transmission dans les échelles de l'impact d'une variation dans l'espace par rapport à l'impact que cette variation aura sur son temps et inversement : par exemple une mutation au niveau de l'ADN (variation de forme (spatiale) à l'échelle du nanomètre, très locale), entraîne potentiellement une variation temporelle dans le maintien de cette mutation (raccourcissement si elle n'est pas viable, élongation si elle l'est (fonctionnelle)) à une échelle de temps plus globale, celle de la vie de l'organisme (jours, mois, année). Mais aussi une cellule qui prend une bifurcation de différenciation (variation, brisure de symétrie au niveau du protéome par exemple) peut avoir un impact sur l'onto-phylogenèse d'un tissu ou d'un organisme.

3.5. La disruption comme polarisation de la tension entropie locale/globale.

Dans (Montévil 2022), la *disruption de premier ordre* est définie comme ce qui détruit l'anti-entropie et la *disruption de second ordre* comme ce qui détruit les capacités de production d'anti-entropie. On peut préciser ces concepts en temps et en espace. La disruption du premier ordre est causée par trop de variations (ouverture à l'entropie locale) en terme de temps (flux trop rapide par rapport à la dynamique de l'organisation) et/ou en terme d'espace (changement trop grand/conséquent

par rapport à la structure de l'organisation) que le système vivant ne peut plus absorber/gérer en se réorganisant, ce qui provoque sa désorganisation complète.

La disruption de second ordre correspond à la destruction de ce qui permet l'apparition de nouveauté. Elle est causée en terme de *temps global* par la sur-stabilité de l'organisation (fermeture à l'entropie locale), ce qui l'empêche d'évoluer, et/ou en terme d'*espace global* par homogénéisation de l'organisation, normalement constituée de la diversité des parties et de leurs relations. Cela détruit les traces de son histoire et les potentialités de production d'anti-entropie qu'elle contient. La variation génétique cryptique est un exemple du rôle de l'histoire qui laisse des traces "cachées". D'après (Paaby et Rockman 2014) : « la variation génétique cryptique (VGC) est invisible dans des conditions normales, mais elle peut alimenter l'évolution quand les circonstances changent. En théorie, la VGC peut représenter une réserve secrète massive de potentiel adaptatif ou bien un pool d'allèles délétères qui nécessitent une constante suppression. » De manière similaire, le transfert horizontal de gènes dans l'évolution (Keeling et Palmer 2008), met en évidence le rôle du passé des gènes transférés et du croisement de trajectoires historiques différentes. L'effacement de l'histoire ou une uniformité excessive (les grandes mono-cultures, les OGM dont les semences sont à renouveler tous les ans...) constituent une forme sévère de disruption écosystémique et évolutive.

Un "sur-plus" d'entropie locale induit de la disruption sur le court terme (premier ordre), alors qu'un "sur-plus" d'entropie globale, comme limitation de l'évolution et suppression de l'histoire et de la diversité qu'elle contient, induit une forte sensibilité à la disruption sur le long terme (second ordre) (voir Fig 3 disruption de premier et second ordre à l'intérieur du carré). Voilà ce que nous entendons par polarisation du côté de l'entropie locale ou de l'entropie globale. Par exemple, si une parcelle en monocultures d'hybride F1 (plante dont les semences ne peuvent être gardées et doivent être rachetée tout les ans) est établie sur une prairie, cela entraîne la destruction de la diversité sur cette prairie et des relations historiques que les plantes et autres organismes avait établies. Les nouveaux organismes hybrides sont tous quasiment identiques génétiquement et ne peuvent s'adapter et développer « une histoire » en relation avec les autres êtres vivants et le micro-climat du fait qu'ils sont remplacés tout les ans par des organismes identiques aux précédents. L'homogénéisation dans l'espace (une seule espèce faite d'individus identiques sans diversité) et dans le temps (pas d'évolution de l'espèce en fonction de son milieu et de son histoire) rend entre autre le champs très vulnérable aux aléas destructeurs (maladies, sécheresse, ravageurs...) et donc à la disruption d'origine anthropique.

4. En guise de synthèse et conclusion

Dans notre analyse, encore très préliminaire, la diversité anti-entropique est obtenue par intégration/assimilation d'entropie locale (variation) dans les structures spatiales et les rythmes temporels des systèmes vivants. On peut alors considérer que la diversité, à tout instant, est le résultat d'une accumulation organisée historiquement de variations stabilisées. L'apparition de nouveautés, constituant une nouvelle diversité, se fait par l'application/intervention de variations (présentes) sur/dans/avec la diversité (variations passées portant l'histoire). Ainsi, le processus de diversification correspond à la variation au présent (entropie locale) de la variation passé (entropie globale). L'entropie locale s'applique/se confronte à celle, globale, du passé, une tension au cœur de la dialectique (niveaux/échelles, espace/temps) à l'origine des systèmes vivants. En physique, le global contraint majoritairement le local, sauf dans certaines transitions critiques (Kumar 1993) et en absence de changement de l'espace des phases, une brisure de la symétrie primaire, de l'"a priori" des théories physiques. C'est à dire, en physique, le passé (par exemple les conditions initiales et aux contours, voire la "dépendance du parcours", trace du passé dans un même espace des phases (Stefanis et al. 2014), contraint le présent et il n'y a pas d'invention/de nouveauté possible (nouvelles observables et paramètres), d'où la possibilité de définir des espaces des phases, et ses symétries fondamentales, à

l'avance⁷. Comme le dit René Thom, en physique mathématique la bifurcation précède la fluctuation : elle est donnée a priori, dans l'espace de toutes les dynamiques possibles – ce qui est incompatible, observe-t-il, avec l'évolution darwinienne (voir ses deux articles dans (Amsterdamski 1990)).

Dans le cas de la *création d'hétérogénéité anti-entropique* en biologie, c'est le local qui l'"emporte" in fine sur le global. Même lors d'un changement global, comme lors l'arrivée d'un météorite sur la Terre il y a 66 mln d'années, c'est le changement local qui a ensuite permis l'apparition de nouveaux organismes et de nouvelles niches. Le vivant serait la revanche du local sur le global, mais de façon partielle et intermittente car l'entropie global permet en contre partie d'ordonner l'entropie locale, c'est à dire de la canaliser par l'historicité (comme agencement d'ensemble de rythme/cycle/contraintes historiques) et de la stabiliser en diversité (comme agencement d'ensemble de localité/structure/réseaux d'interaction) en tant que composantes de l'homogénéisation. Imaginons par exemple que la tension local/global soit à l'équilibre (c'est le cas si des bactéries ont un taux constant de mutation par reproduction), or l'équilibre, la stabilité, est une caractéristique tendancielle de l'entropie globale. Alors, dans ce cas, l'entropie global domine dans le temps et limite, sans la bloquer, la production d'anti-entropie (diversification et poursuite de l'historicité), ce qui rendra sensible à des fluctuations globales (excès écosystémique de la reproduction, appauvrissement du milieu, changement météorologiques...). D'ailleurs, chez de nombreuses bactéries le taux de mutation peut varier (variation de la variation locales) en fonction du changement de leur environnement et du stress (Foster 2007). Et, nous le savons bien, les micro-organismes contribuent massivement à l'évolution. Encore une fois, le phénomène entropique local, relativement à plusieurs échelles, ouvre la voie à une possible nouveauté évolutive, un co-constitué de la tension local/global elle-même changeante et contrainte.

Bibliographie

Amsterdamski, S. 1990. *La querelle du déterminisme*. Gallimard. Paris.

Bailly, F, et G Longo. 2006. *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*. Hermann. Paris.

———. 2009. « Biological organization and anti-entropy ». *Journal of Biological Systems* 17 (01): 63-96.
<https://doi.org/10.1142/S0218339009002715>.

Benasayag, Miguel, et Bastien Cany. 2021. *Les nouvelles figures de l'agir*. La Découverte. Cahiers libres. Paris.

Bizzarri, M., A. Giuliani, A. Cucina, F. D'Anselmi, A. M. Soto, et C. Sonnenschein. 2011. « Fractal Analysis in a Systems Biology Approach to Cancer ». *Seminars in Cancer Biology* 21 (3): 175-82.
<https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2011.04.002>.

Brillouin, L. 1956. *Science and Information Theory*. Academic Press. New York.

Calude, Cristian. 2002. *Information and Randomness : An Algorithmic Perspective (Texts in Theoretical Computer Science. An EATCS Series)*.

Calude, Cristian, et Giuseppe Longo. 2016. « Classical, Quantum and Biological Randomness as Relative Unpredictability ». *Natural Computing* 15 (2): 263-78. <https://doi.org/10.1007/s11047-015-9533-2>.

Campo, Alessandra, et Simone Gozzano. 2021. *Einstein vs. Bergson: An Enduring Quarrel on Time*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

⁷ Une exception est constitué par l'astrophysique, lors des spéculations concernant les premières secondes après les Big Bang, quand se créent et stabilisent les grandes constantes universelles et la matières dans ses structures fondamentales. L'astrophysique aurait alors beaucoup à apprendre de l'historicité du biologique, voir, pour un débat, les articles dans (Campo et Gozzano 2021).

Cazzolla Gatti, Roberto, Brian Fath, Wim Hordijk, Stuart Kauffman, et Robert Ulanowicz. 2018. « Niche Emergence as an Autocatalytic Process in the Evolution of Ecosystems ». *Journal of Theoretical Biology* 454 (octobre): 110-17. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.05.038>.

Chibbaro, Sergio, Lamberto Rondoni, et Angelo Vulpiani. 2014. *Reductionism, emergence and levels of reality: The importance of being borderline. Reductionism, Emergence and Levels of Reality: The Importance of Being Borderline*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06361-4>.

Duffin, R. J., et C. Zener. 1969. « Geometric programming, chemical equilibrium, and the anti-entropy function* ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 63 (3): 629-36. <https://doi.org/10.1073/pnas.63.3.629>.

Foster, Patricia L. 2007. « Stress-Induced Mutagenesis in Bacteria ». *Critical reviews in biochemistry and molecular biology* 42 (5): 373-97. <https://doi.org/10.1080/10409230701648494>.

Georgescu-Roegen, N. 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge: Harvard University Press.

Gould, Stephen Jay. 1997. *Full House: The Spread of Excellence from Plato to Darwin*. First paperback edition. New York: Three Rivers Press.

Huang, K. 1987. *Statistical Mechanics*. Second edition. New York: Wiley.

Kauffman, Stuart A. 2003. *Investigations: Investigations*. Oxford, New York: Oxford University Press.

Keeling, Patrick J., et Jeffrey D. Palmer. 2008. « Horizontal Gene Transfer in Eukaryotic Evolution ». *Nature Reviews. Genetics* 9 (8): 605-18. <https://doi.org/10.1038/nrg2386>.

Koppl, Roger, Stuart Kauffman, Teppo Felin, et Giuseppe Longo. 2015. « Economics for a creative world: A response to comments ». *Journal of Institutional Economics* 11 (1): 61-68. <https://doi.org/10.1017/S1744137414000514>.

Kumar, Pradeep. 1993. « The Theory of Critical Phenomena: An Introduction to the Renormalization Group. By J. J. Binney, N. J. Dowrick, A. J. Fisher, and M. E. J. Newman, Clarendon Press, Oxford, 1992. 464 Pp. » *International Journal of Quantum Chemistry* 46 (5): 671-671. <https://doi.org/10.1002/qua.560460507>.

Laguës, M, et A Lesne. 2003. *Invariance d'échelle*. Paris: Belin.

Leff, Harvey S, et Andrew F Rex. 1990. *Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing*. Bristol: Adam-Hilger.

Longo, G. 2016. « A review-essay on reductionism: some reasons for reading “Reductionism, Emergence and Levels of Reality. The Importance of Being Borderline”, a book by S. Chibbaro, L. Rondoni, A. Vulpiani ». In *Urbanomic*. <https://www.urbanomic.com/document/on-the-borderline/>.

———. 2019. *Comment le futur dépend du passé et des événements rares dans les systèmes du vivant*. Odile Jacob. <https://hal-ens.archives-ouvertes.fr/hal-03319824>.

———. 2020a. « Information at the Threshold of Interpretation: Science as Human Construction of Sense ». *A Critical Reflection on Automated Science*, 67.

———. 2020b. « Naturalizing Physics Or, embedding physics in the historicity and materiality of the living », juin.

Longo, G, et M Montévil. 2011. « From Physics to Biology by Extending Criticality and Symmetry Breakings ». In *Perspectives on Organisms: Biological Time, Symmetries and Singularities*, édité par Giuseppe Longo et Maël Montévil, 106(2):340-347. Special issue of *Progress in Biophysics and Molecular Biology*.

———. 2012. « Randomness Increases Order in Biological Evolution ». In *Computation, Physics and Beyond: International Workshop on Theoretical Computer Science, WTCS 2012, Dedicated to Cristian S. Calude on the Occasion of His 60th Birthday, Auckland, New Zealand, February 21-24, 2012, Revised Selected and Invited Papers*, édité par Michael J. Dinneen, Bakhadyr Khossainov, et André Nies, 289-308. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27654-5_22.

———. 2013. « Extended Criticality, Phase Spaces and Enablement in Biology ». <https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2013.03.008>.

- . 2014a. « A 2-Dimensional Geometry for Biological Time ». In *Perspectives on Organisms: Biological Time, Symmetries and Singularities*, édité par Giuseppe Longo et Maël Montévil, 75-97. Lecture Notes in Morphogenesis. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35938-5_3.
- . 2014b. *Perspectives on Organisms*. Lecture Notes in Morphogenesis. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35938-5>.
- Longo, G, M Montévil, et S Kauffman. 2012. « No Entailing Laws, but Enablement in the Evolution of the Biosphere ». In *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1379-92. New York, NY, USA, : Acm.
- Longo, G, M Montévil, et A Pocheville. 2012. « From Bottom-up Approaches to Levels of Organization and Extended Critical Transitions ». *Frontiers in Physiology* 3: 232. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00232>.
- Longo, G, M Montévil, Carlos Sonnenschein, et Ana M. Soto. 2015. « In Search of Principles for a Theory of Organisms ». *Journal of Biosciences* 40 (5): 955-68. <https://doi.org/10.1007/s12038-015-9574-9>.
- Marinucci, A. 2022. *From deterministic biology to relational biology*. À paraître. Berlin: Springer.
- Martin, William F., Sriram Garg, et Verena Zimorski. 2015. « Endosymbiotic Theories for Eukaryote Origin ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 370 (1678): 20140330. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0330>.
- Montévil, M. 2021. « Entropies and the Anthropocene Crisis ». *AI & SOCIETY*, mai. <https://doi.org/10.1007/s00146-021-01221-0>.
- . 2022. « Disruption of biological processes in the Anthropocene: the case of phenological mismatch ». <https://hal-ens.archives-ouvertes.fr/hal-03574022>.
- Montévil, M, et M Mossio. 2015. « Biological Organisation as Closure of Constraints ». *Journal of Theoretical Biology* 372 (mai): 179-91. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2015.02.029>.
- . 2020. « The Identity of Organisms in Scientific Practice: Integrating Historical and Relational Conceptions ». *Frontiers in Physiology* 11. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2020.00611>.
- Nicolis, Gregoire, et Ilya Prigogine. 1977. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*. Wiley.
- Ouellet, Jimmy, et Yves Barral. 2012. « Organelle segregation during mitosis: Lessons from asymmetrically dividing cells ». *The Journal of Cell Biology* 196 (3): 305-13. <https://doi.org/10.1083/jcb.201102078>.
- Paaby, Annalise B., et Matthew V. Rockman. 2014. « Cryptic Genetic Variation: Evolution's Hidden Substrate ». *Nature Reviews. Genetics* 15 (4): 247-58. <https://doi.org/10.1038/nrg3688>.
- Sakharov, Andrei D. 1991. « Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe ». *Soviet Physics Uspekhi* 34 (5): 392. <https://doi.org/10.1070/PU1991v034n05ABEH002497>.
- Sarti, A., G. Citti, et D. Piotrowski. 2019. « Differential heterogenesis and the emergence of semiotic function ». *Semiotica*. <https://doi.org/10.1515/sem-2018-0109>.
- Schrödinger, E. 1944. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge: University Press.
- Soto, Ana M., Giuseppe Longo, Paul-Antoine Miquel, Maël Montévil, Matteo Mossio, Nicole Perret, Arnaud Pocheville, et Carlos Sonnenschein. 2016. « Toward a Theory of Organisms: Three Founding Principles in Search of a Useful Integration ». *Progress in Biophysics and Molecular Biology, From the Century of the Genome to the Century of the Organism: New Theoretical Approaches*, 122 (1): 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2016.07.006>.
- Stefanis, N. G., I. O. Cherednikov, A. I. Karanikas, et M. Polyakov. 2014. « Special Issue on Path Dependence in Quantum Physics ». *Physics of Particles and Nuclei* 45 (4): 655-655. <https://doi.org/10.1134/S1063779614040078>.
- Stiegler, Barbara. 2021. *Nietzsche et la vie, Barbara Stiegler, 2021*. Gallimard. Folio Essais.

West-Eberhard, Mary Jane. 2003. *Developmental Plasticity and Evolution*. Oxford, New York: Oxford University Press.

———. 2005. « Developmental plasticity and the origin of species differences ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102 (suppl_1): 6543-49. <https://doi.org/10.1073/pnas.0501844102>.