

Echelles d'individuation, complexité et morphogenèse¹.

Vincent Bontems, LARSIM-CEA.

L'individuation s'opère à travers la résolution des tensions internes d'un système métastable et l'actualisation de certains de ses potentiels. L'ensemble de la réalité préindividuelle ne se retrouve pas dans l'individu, car l'opération produit à la fois l'individu et son milieu associé. Mais la persistance d'énergies potentielles dans l'être ne s'explique pas seulement par ce déphasage. La rémanence de la réalité préindividuelle auprès et au sein des individus dérive aussi du fait que l'individuation établit une médiation entre plusieurs ordres de grandeur :

« Le véritable principe d'individuation est médiation, supposant généralement dualité originelle des ordres de grandeur et absence initiale de communication interactive entre eux, puis communication entre ordres de grandeur et stabilisation. En même temps qu'une énergie potentielle (condition d'ordre de grandeur *supérieur*) s'actualise, une matière s'ordonne et se répartit (condition d'ordre de grandeur *inférieur*) en individus structurés à un ordre de grandeur *moyen*, se développant par un processus médiat d'amplification »².

Cette conception de l'individuation en tant qu'amplification s'écarte du modèle réductionniste des ontologies classiques du monde physique : à chaque échelle, la dynamique du système étudié y est supposée analysable à travers les interactions d'unités individuelles dont l'organisation interne et la dynamique d'évolution sont elles-mêmes renvoyées à l'analyse d'un système d'individualités d'ordre de grandeur inférieur. Au contraire, chez Simondon, la réalité ne peut jamais se réduire à un système d'individualités en acte sans reste, car à toutes les échelles se manifeste l'existence de potentiels non-actualisés. Et ces énergies potentielles ne sont pas réductibles à des propriétés des individus comme le voudrait Leibniz :

« la force vive fait partie du système de l'actualité ; elle définit une énergie actuelle, non une énergie potentielle. Or, les énergies potentielles sont précisément celles qui sont toujours des énergies relatives à l'état d'un système, mais non à un individu pris absolument ; elles sont des énergies de relation ; il faut, pour qu'elles existent, des systèmes d'individus. Elles donnent une réalité à la relation. Or, pour rendre compte de l'individualité, il faut aussi supposer un certain potentiel ; l'individu ne s'explique pas complètement dans le système de l'actualité »³.

¹ Une première version de ce texte a été publiée dans les *Cahiers Simondon*, n°2, L'Harmattan, 2010, p. 81-98.

² SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Million, 2007, p. 27.

³ SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Million, 2005, p. 456.

Si l'on suit le raisonnement de Simondon, l'existence d'énergies potentielles qui, à première vue, dépendent de l'état des relations entre individus témoigne en réalité de la persistance résiduelle de la réalité préindividuelle fondamentale dont les individus résultent. La problématique de la complexité, qui s'ouvre au XX^e siècle avec l'avènement de la théorie de la relativité générale et de la mécanique quantique, qui s'appliquent respectivement à l'infiniment grand et à l'infiniment petit, correspond à la prise de conscience épistémologique des difficultés conceptuelles qui surgissent dès lors qu'on entend suivre le processus d'individuation physique à travers les échelles.

Nous proposons ici une note de travail issue de nos recherches menées à l'Atelier Simondon⁴. Il s'agit de prolonger l'analyse de l'épistémologie des relations d'échelles⁵, en la plaçant sous le signe de la complexité, suivant en cela une suggestion de Jean-Hugues Barthélémy⁶, et en renouant avec notre tentative de réactualisation de la théorie simondonienne de l'individuation au contact des théories contemporaines, notamment de la théorie de la relativité d'échelle (TRE) de Laurent Nottale⁷. Il existe un accord méthodologique et métaphysique entre les conceptions physiques de la TRE⁸ et le « postulat du réalisme de la relation » de Simondon. Celui-ci affirme l'antériorité ontologique des relations sur leurs termes et accorde valeur d'être à une relation construite entre deux relations ayant elle-même rang d'être. Cette relation analogique s'étend aussi, selon nous, à « l'hypothèse quantique » énoncée par Simondon :

« on peut faire une hypothèse, analogue à celle des quanta en physique, analogue aussi à la relativité des niveaux d'énergie potentielle : on peut supposer que l'individuation n'épuise pas toute la réalité préindividuelle, et qu'un régime de métastabilité est non seulement entretenu par l'individu, mais porté par lui, si bien que l'individu constitué transporte avec lui une certaine charge associée de réalité préindividuelle, animée par tous les potentiels qui la caractérisent ; une individuation est relative comme un changement de structure dans un système physique ; un certain niveau de potentiel demeure, et des individuations sont encore possibles. Cette nature préindividuelle restant associée à l'individu est une source d'états métastables futurs d'où pourront sortir des individuations nouvelles. (...) La participation pour l'individu, est *le fait d'être élément dans une individuation plus vaste par l'intermédiaire de la charge de réalité préindividuelle que l'individu contient, c'est-à-dire grâce aux potentiels qu'il recèle* »⁹

⁴ L'Atelier Simondon est un groupe de recherche animé par Vincent Bontems, Giovanni Carrozzini et Frédéric Pascal, qui organise ses séminaires, avec Jean-Hugues Barthélémy, à l'Ecole Normale Supérieure : atelier-simondon.ens.fr

⁵ BONTEMS, « Quelques éléments pour une épistémologie des relations d'échelle chez Gilbert Simondon. Individuation, Technique, et Histoire », *Appareil*, n°2, 2008.

⁶ BARTHELEMY, *Simondon ou l'Encyclopédisme génétique*, Paris, PUF, 2008.

⁷ NOTTALE, *La Relativité dans tous ses états. Au-delà de l'espace et du temps*, Paris, Hachette, 1998. BARTHELEMY & BONTEMS, « Relativité et Réalité. Nottale, Simondon et le réalisme des relations », *Revue de Synthèse*, Albin Michel, n°1, 2001, p. 27-54.

⁸ Nottale pose en effet que « Si les choses n'existent pas de manière absolue, mais existent néanmoins, leur nature est à rechercher dans les relations qui les unissent. Seuls existent les rapports entre les objets, non les objets par eux-mêmes. Ceux-ci sont donc vides en soi, et doivent se réduire à l'ensemble de leurs rapports avec le reste du monde. Ils sont ces rapports » (*La Relativité dans tous ces états*, p. 107).

⁹ SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Million, 2005, p. 28-29.

Simondon affirme donc que la persistance de la préindividualité ne doit pas seulement être comprise dans sa dimension temporelle (« encore possible ») mais aussi celle du déploiement spatial (« *individuation plus vaste* »), ce qui implique de traverser les échelles. Or, non seulement la géométrie fractale employée en relativité d'échelle pour décrire l'espace-temps non-différentiable correspond à la recherche d'un schématisme adapté à l'appréhension d'une réalité physique dont la préindividualité radicale se manifeste aux échelles quantiques¹⁰, mais l'approfondissement théorique accompli par Nottale induit la possibilité d'une transposition formelle de « l'équation de Schrödinger généralisée » à d'autres échelles, ce qui engendre la modélisation d'effets quantiques, notamment sous forme de processus morphogénétiques, à ces autres échelles. Cette formalisation de l'hypothèse quantique soulève l'enjeu de la complexité des relations d'échelle entre les divers modèles physiques qui correspondent à plusieurs niveaux d'objectivation des phénomènes dans la nature.

Toutefois, il est à noter que Simondon avançait justement son hypothèse à propos du vivant :

« Selon cette hypothèse, il serait possible de *considérer toute véritable relation comme ayant rang d'être, et comme se développant à l'intérieur d'une individuation nouvelle* ; la relation ne jaillit pas entre deux termes qui seraient déjà des individus ; elle est un aspect de la *résonance interne d'un système d'individuation* ; elle fait partie d'un état de système. Ce vivant qui est à la fois plus et moins que l'unité comporte *une problématique intérieure et peut entrer comme élément dans une problématique plus vaste que son propre être* »¹¹.

En effet, le processus d'individuation ne se contente pas d'engendrer la diversité des structures physiques de l'univers, il traverse en outre trois régimes distincts (physique, biologique et psycho-collectif). Simondon conçoit le vivant comme une complexification du physique qui repose justement sur la capacité des organismes biologiques à conserver en eux (c'est-à-dire dans la tension entre leurs différents niveaux d'organisation) davantage de préindividualité :

« Il est habituel de voir dans les processus vitaux une complexité plus grande que dans les processus non vitaux, physico-chimiques. Pourtant, pour être fidèle, même dans les conjectures les plus hypothétiques, à l'intention qui anime cette recherche, nous supposerions que l'individuation vitale ne vient pas *après* l'individuation physico-chimique, mais pendant cette individuation, avant son achèvement, en la suspendant au moment où elle n'a pas atteint son équilibre stable, et en la rendant capable de s'étendre et de se propager avant l'itération de la structure parfaite capable seulement de se répéter, ce qui conserverait dans l'individu vivant quelque chose de la tension préindividuelle, de la communication active, sous forme de résonance interne, entre les ordres extrêmes de grandeur ».¹²

Cet enveloppement de l'individuation biologique au sein de l'individuation physique, où la complexification des niveaux d'individuation apparaît comme l'intégration de la tension entre les échelles, impose de mettre au clair le rapport entre complexité physique et complexité biologique. Il y a bien une

¹⁰ En TRE, l'espace-temps est fractal à toutes les échelles ; mais cette fractalité ne se manifeste qu'à partir de l'échelle de De Broglie qui définit la transition du régime classique (non fractal) vers le régime quantique (fractal). Aux échelles supérieures, la fractalité est présente mais dominée par les effets du mouvement classique.

¹¹ SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Million, 2005, p. 28-29.

¹² SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Million, 2005, p. 152.

originalité de la connaissance du vivant par rapport à la connaissance physique, mais elle ne signifie pas l'existence de domaines réels séparés. Si bien qu'il faut prendre en compte les progrès de l'allagmatique physico-biologique (l'épistémologie des interfaces entre physique et biologie) pour saisir le processus d'individuation à travers plusieurs régimes. Confronter séparément chaque régime d'individuation à l'état des sciences lui correspondant n'y suffirait pas.

C'est pourquoi nous en revenons à la problématique de la complexité, ouverte par Bachelard dans l'entre-deux-guerres et popularisée par Warren Weaver en 1948¹³, avant d'envisager les efforts répétés de Nottale et de ses collaborateurs¹⁴ pour transposer analogiquement aux sciences de la vie certains des concepts issus ou dérivés de la relativité d'échelle, en particulier ceux destinés à fonder une biologie systémique capable d'expliquer l'émergence et l'intégration des différents niveaux d'organisation des vivants.

Echelles d'individuation et régimes de complexité

L'article séminal « Science and Complexity » reprend les éléments que Weaver avait présentés un an auparavant dans son livre *The Scientists Speak*¹⁵ : il y relève en particulier l'inadéquation des outils conceptuels hérités de la physique classique pour appréhender la complexité des organismes vivants. Selon lui, la méthode et les concepts classiques ont avant tout été élaborés afin de saisir la simplicité. Il rejoint ainsi, sans le savoir, le constat énoncé par Gaston Bachelard dès 1934, dans *Le Nouvel Esprit scientifique*, au sujet de la péremption de la méthode cartésienne réductive. Bachelard insistait sur l'antériorité du complexe sur le simple dans la nouvelle physique : « Alors que la science d'inspiration cartésienne faisait très logiquement du complexe avec du simple, la pensée scientifique contemporaine essaie de lire le complexe réel sous l'apparence simple fournie par les phénomènes compensés »¹⁶. Ce constat relève de la prise en compte des résultats de la mécanique quantique (et de la refondation de la chimie qu'elle rend possible), il ne concerne pas prioritairement le passage de l'individuation physique à l'individuation biologique. La problématique de la complexité s'impose en physique sans qu'il soit fait état de l'originalité des systèmes biologiques.

Pour autant, les schémas d'analyse de Bachelard et Weaver se recoupent largement à travers leur critique du modèle réductionniste. Weaver distingue trois régimes de complexité : d'abord celui des « problèmes de la simplicité », quand il s'agit d'établir la loi d'évolution (l'équation différentielle) d'un système à deux variables, ce qui correspond aux procédures de la mécanique rationnelle. Aussi « compliqués » que soient ces problèmes, la méthode consiste toujours à les décomposer pour se ramener aux éléments les plus simples et à comprendre la dynamique d'évolution du système grâce à leurs relations mutuelles. C'est exactement ce que Bachelard appelle le « postulat d'analyticité » par lequel il caractérise la méthode cartésienne réductive. Cette méthodologie présuppose une ontologie où la simplicité règne à l'échelle la plus

¹³ WEAVER, « Science and Complexity », *American Scientist*, 36: 536, 1948.

¹⁴ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Les Arbres de l'évolution*, Paris, Ellipse, 2000. AUFRAY & NOTTALE, « Le défi de la biologie systémique intégrative : développer une théorie du vivant fondée sur les principes premiers de la relativité d'échelle », in GROU (dir), *Les Grands Défis scientifiques et technologiques du XXIe siècle*, Paris, Ellipse, 2008. NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger. La relativité d'échelle et ses applications*, Paris, Hachette, 2009.

¹⁵ WEAVER, *The Scientists Speak*, New York, Boni & Gaer, 1947.

¹⁶ BACHELARD, *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, PUF, 1983 (1934), p. 143.

fondamentale et elle entre en crise avec la mécanique quantique. Le second régime est celui de la « complexité désorganisée » : l'étude de l'évolution du système est rendu possible par le recours à des méthodes statistiques, comme dans la mécanique statistique ou en thermodynamique. Ce modèle de complexité désorganisée s'applique aux systèmes dont la dynamique et les propriétés sont expliquées par les éléments d'une échelle inférieure (la température est expliquée par l'agitation moléculaire, par exemple) dont on ignore la situation précise : on étudie par conséquent le résultat agrégé d'une répartition initiale aléatoire de ces éléments. Cette physique n'implique plus de préciser les événements à l'échelle des individus mais à établir un déterminisme linéaire à l'échelle du système. Bachelard a examiné en détail l'élaboration de ces instruments dans son *Etude sur l'évolution d'un problème en physique. La propagation de la chaleur dans les solides*¹⁷. Enfin, Weaver dégage un troisième régime, celui de la « complexité organisée », où les problèmes « impliquent d'avoir affaire simultanément avec un nombre considérable de facteurs qui sont en interdépendance au sein d'une totalité organique »¹⁸. Il a en vue des problèmes qui dépassent le champ de la physique et s'adressent aux sciences du vivant (et aux sciences sociales). Il s'inscrit alors dans la mouvance de la cybernétique naissante et en appelle au « développement de nouveaux types d'instruments de calcul électroniques ».

C'est là où apparaît la divergence entre sa définition de la complexité organisée et la réflexion de Bachelard qui nous mène aux enjeux de la théorie de l'individuation et de l'éventuelle formalisation des processus morphogénétiques. Pour Bachelard, la réforme intellectuelle s'opère en premier lieu à partir de la physique et renverse le substantialisme de l'ontologie cartésienne : « En réalité, il n'y a pas de phénomènes simples ; le phénomène est un tissu de relations. Il n'y a pas de nature simple, de substance simple ; la substance est une contexture d'attributs »¹⁹. Avant d'envisager le transfert d'équations mathématiques à d'autres disciplines, la complexité désigne l'émergence de nouveaux problèmes en physique, ceux de l'évolution non linéaire des systèmes loin de l'équilibre, de la turbulence, des transitions de phase du second ordre, etc. L'analyse de Bachelard se limite donc, dans un premier temps, à la physique et caractérise la complexité dans cet horizon : la complexité s'oppose à l'idéal cartésien classique qui suppose la réduction possible par l'analyse de l'évolution de tout système aux individus constitués à une échelle fondamentale (que cette échelle privilégiée soit la plus petite ou celle du tout, d'ailleurs). La complexité des problèmes apparaît ainsi dans la tension entre deux niveaux d'objectivation des systèmes et résulte de la difficulté à les accorder. Simondon indique en ce sens que le déterminisme des systèmes simples et l'indéterminisme des systèmes complexes instables (loin de l'équilibre) correspondent à deux cas extrêmes de corrélation et de décorrélation de l'évolution temporelle des échelons de grandeur imbriqués dans ces systèmes :

« ce n'est qu'abstraitement que l'on peut parler d'un indéterminisme absolu (réalisable par une résonance interne complète) ou d'un déterminisme absolu (réalisable par une indépendance complète entre chronologie et topologie). Le cas général est celui d'un certain niveau de corrélation entre chronologie et topologie d'un système, niveau d'ailleurs variable en fonction des vicissitudes de son propre devenir ; un système réagit sur lui-

¹⁷ BACHELARD, *Etude sur l'évolution d'un problème de physique. La propagation de la chaleur dans les solides*, Paris, Vrin, 1927.

¹⁸ WEAVER, « Science and Complexity », *American Scientist*, 36: 536, 1948 : « all problems which involve dealing simultaneously with a sizeable number of factors which are interrelated into an organic whole ».

¹⁹ BACHELARD, *Le Nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1983 (1934), p. 152.

même non pas seulement au sens du principe de l'entropie, par la loi générale de ses transformations énergétiques internes, mais aussi en modifiant sa propre structure à travers le temps »²⁰

La théorie de l'individuation simondonienne met ainsi en relation la complexité des systèmes physiques avec les processus morphogénétiques. L'élucidation de la complexité organisée physique ne peut pas être éludée quand on souhaite aborder la complexité de l'individuation biologique. Tous les niveaux d'organisation des êtres vivants apparaissent comme une bande médiane limitée et assez étroite comparée au spectre des ordres de grandeur de toutes les structures de l'univers physique. Peut-être cette situation médiane rend-elle leurs relations relativement indépendantes des relations entre les échelles physiques, ou au contraire cela témoigne-t-il des fortes contraintes que les rapports d'échelle physiques exercent sur les processus d'individuation biologique. La complexité « organisée » de la physique pourrait alors jouer le rôle d'une complexité *organisante* au sein de la biologie.

Les analogies morphogénétiques de la relativité d'échelle

La théorie de la relativité d'échelle élaborée par Nottale²¹ ouvre des perspectives inédites et fécondes dans la compréhension des processus morphogénétiques à partir des relations d'échelle. En relativité d'échelle, l'équation de Schrödinger qui régit l'état stationnaire en mécanique quantique est déduite de la configuration fractale de l'espace-temps aux échelles inférieures à la longueur de De Broglie et au temps de Compton. La fonction d'onde émerge comme la manifestation du champ de vitesse complexe (au sens des nombres complexes) d'une infinité de géodésiques fractales. Il existe deux autres représentations équivalentes de cette équation des géodésiques fractales : elle s'intègre sous forme d'une équation de Schrödinger généralisée (définissant une densité de probabilité P et une phase θ) ou sous la forme d'une équation hydrodynamique portant sur la densité de probabilité P et sur le champ de vitesse V . Dans ce dernier cas, apparaît le « potentiel quantique »²², un terme d'énergie potentielle supplémentaire par rapport à l'équation d'Euler habituelle, qui est induit par la fractalité de l'espace-temps de la même manière que le potentiel de gravitation newtonien exprime la courbure en relativité générale. Ce potentiel quantique permet alors de prédire des comportements spontanés de la matière : sa présence induit statistiquement des situations d'auto-organisation analogues à celle d'un fluide quantique, son annulation correspond à la faible capacité d'organisation des fluides classiques, et son inversion à une désorganisation diffuse.

Or Nottale estime que le domaine d'application de ces équations ne se réduit pas aux échelles de la mécanique quantique où intervient la constante de Planck, et qu'elles peuvent aussi s'appliquer à des systèmes mésoscopiques ou macroscopiques où le rôle de cette constante sera tenu par une autre constante qui dépendra du système considéré. Ce « régime de Schrödinger macroscopique »²³ fournit une approche inédite

²⁰ SIMONDON, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Million, 2005, p. 148.

²¹ Un historique de ce développement se trouve dans BONTEMS & GINGRAS « De la science normale à la science marginale. Analyse d'une bifurcation de trajectoire scientifique : le cas de la Théorie de la Relativité d'Échelle », *Information sur les Sciences Sociales*, Londres, SAGE, 2007, p. 607-653.

²² NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 19.

²³ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 19.

de l'auto-organisation complexe des systèmes structurés en échelle : « On peut générer une gamme d'équations de Schrödinger ou leurs généralisations à des échelles différentes, couplées entre elles par raccordement des fonctions d'onde, ou mieux par les solutions de la nouvelle mécanique quantique dans l'espace des échelles, ce qui permet une intégration des échelles (un des enjeux majeurs de la biologie), etc. »²⁴. Cette transposition analogique de l'équation de Schrödinger à d'autres échelles n'est pas une conséquence de la mécanique quantique, il s'agit d'une formalisation de « l'hypothèse quantique » au sens de Simondon :

« Il faut bien distinguer les effets *quantiques macroscopiques déjà connus* (tels la supraconductivité), au sens de la *mécanique quantique standard* fondée sur la *constante microscopique universelle de Planck*, de la proposition d'une nouvelle sorte d'*effets quasi-quantique macroscopique* déduits de la relativité d'échelle et fondés sur une *constante d'auto-organisation* qui est *propre au système considéré et n'a plus de raison d'être microscopique* »²⁵

Cette « nouvelle *mécanique macroquantique* dans l'espace des échelles » pourrait s'appliquer au vivant de la façon suivante : les diverses solutions de l'équation généralisée de Schrödinger dans l'espace ordinaire et dans l'espace des échelles correspondant à un nombre croissant de niveaux hiérarchiques imbriqués : « Dans l'espace des échelles, on peut passer d'une description classique déterministe à une description de type quantique à l'aide d'une équation de Schrödinger agissant dans cet espace, permettant de rendre compte de manière probabiliste d'une *organisation hiérarchique* »²⁶. Ce rôle structurant de la relativité d'échelle repose sur une quantité conservative dans l'espace des échelles qui joue un rôle analogue à l'énergie dans l'espace des mouvements, ce que Nottale nomme la « *complexergie* » et dont les « sauts » correspondent à la discrétisation des structurations possibles du système. Cette formalisation inédite de l'évolution morphogénétique répond aux exigences de la théorie de l'individuation et elle éclaire en profondeur la problématique de la complexité en définissant ce que nous appelons un « *transdéterminisme* », c'est-à-dire la transition entre divers régimes de modélisation d'un système suivant l'échelle à laquelle il est considéré :

« En effet, s'il est évident que les systèmes simples obéissent clairement à des *lois déterministes linéaires*, il arrive cependant que leurs comportements à long terme deviennent partiellement *non-linéaires* et peuvent alors mener au *chaos* totalement imprévisible au-delà de certains seuils. C'est ce que l'on appelle le '*déterminisme chaotique*'. (...) Dans le cadre de l'approche relativiste d'échelle, de tels systèmes chaotiques, théoriquement décrits par les équations déterministes de la *physique classique de Newton*, pourraient être régis par de nouvelles équations *non déterministes de type probabilistes et quantique* au-delà d'un certain horizon temporel d'imprédictibilité. La *relativité d'échelle* interviendrait ainsi '*au-delà du chaos*', pour générer des structures statistiques à partir de trajectoires individuelles non-déterministes et imprévisibles »²⁷

²⁴ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 21.

²⁵ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 139.

²⁶ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 139.

²⁷ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 208.

L'astrophysique fournit des exemples spectaculaires de l'application de l'équation de Schrödinger généralisée et de ce transdéterminisme : une nébuleuse protoplanétaire est formée d'un très grand nombre de « planétésimaux » dont l'accrétion sous l'effet de la gravité produit une planète. Sur une courte échelle de temps, chacun de ces planétésimaux suit une portion d'orbite képlérienne selon les équations de la mécanique classique caractérisées par des quantités conservatives telles que l'énergie, le moment angulaire, etc. Mais si l'on considère l'évolution du système à une échelle plus grande, il faut prendre en compte les innombrables déviations gravitationnelles dues aux rencontres avec les autres planétésimaux. La trajectoire de chacun d'eux devient chaotique et, au-delà d'un certain horizon temporel de prédictibilité, très grand par rapport au temps de libre parcours moyen (qui dépend lui-même de l'évolution du processus de formation planétaire), elle est modélisable par les équations du mouvement brownien. Le système entre alors dans un régime de complexité désorganisée où l'on ne se préoccupe plus des éléments orbitaux individuels mais seulement de la distribution statistique de probabilités. La relativité d'échelle permet d'aller plus loin dans la modélisation dans la mesure où sont réunies les trois conditions sous lesquelles l'équation fondamentale de la dynamique du système prend la forme, après changement de variable et intégration, d'une équation de Schrödinger généralisée : une infinité de trajectoires possibles caractérisables par un champ de vitesses dépendant du temps mais aussi de l'échelle ; chacune de ces trajectoires est fractale (la dimension fractale étant celle du mouvement brownien) ; un dédoublement des vitesses apparaît en raison de l'irréversibilité du processus en fonction de la dépendance d'échelle à l'égard de la résolution temporelle, c'est-à-dire des éléments dt (dépendance qui ne doit pas être confondue avec l'évolution en fonction du temps t). En introduisant l'équation de Schrödinger généralisée, la relativité d'échelle fait passer l'étude du système d'un régime de complexité désorganisée à celui d'une complexité organisante.

La relativité d'échelle produit ainsi des analogies formelles inédites entre les échelles : la fonction d'onde, qui ne s'applique qu'aux petites échelles de la mécanique quantique, est généralisée sous une forme dont le domaine s'étend désormais à toutes les échelles physiques pour peu que les conditions théoriques soient réunies. Mais, en outre, cette modélisation des processus morphogénétiques ne concerne pas que l'individuation physique et les concepts dérivés de la relativité d'échelle font apparaître des analogies formelles entre des processus physiques astronomiques et des processus biologiques mésoscopiques, par exemple. Ainsi, les travaux de Nottale et de Daniel Da Rocha montrent comment l'équation de Schrödinger généralisée prédit la structure des « nébuleuses planétaires » (qui désignent en fait une étape de l'évolution ordinaire des étoiles de faible masse durant laquelle ces étoiles éjectent leur enveloppe extérieure qui est ionisée par la radiation de l'étoile centrale et devient lumineuse et donc observable par nos télescopes) :

« Dans le cadre de l'approche relativiste d'échelle, les équations qui décrivent une telle éjection (fig. 1.21) se ramènent à une équation de Schrödinger typique de celles qu'on rencontre dans la description d'un processus de collision en physique des particules (da Rocha et Nottale, 2003a, b). Comme on le verra, la même équation peut également être utilisée pour décrire un processus de croissance florale (fig. 1.22). Dans tous les cas, qui correspondent pourtant à trois échelles très différentes, les échelles microscopiques des atomes et des molécules, les échelles mésoscopiques du vivant et les grandes échelles astronomiques, la nature du problème posé est semblable : *il s'agit de décrire une croissance ou une éjection à partir d'un centre*, ce qui se ramène dans

un cadre de mécanique de type quantique à l'évolution d'une onde de probabilité sphérique sortante (ou entrante), solution d'une équation de Schrödinger »²⁸

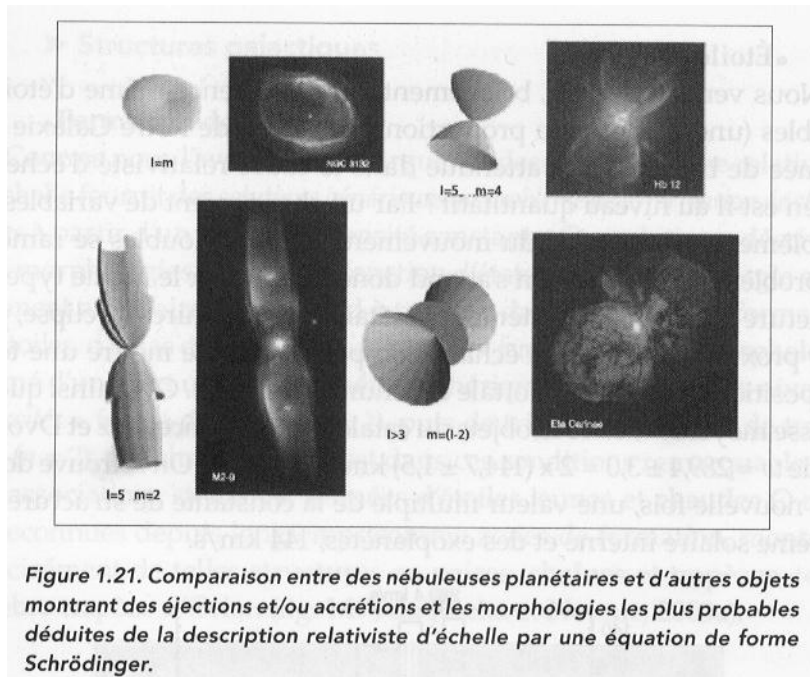


Figure 1.21. Comparaison entre des nébuleuses planétaires et d'autres objets montrant des éjections et/ou accrétions et les morphologies les plus probables déduites de la description relativiste d'échelle par une équation de forme Schrödinger.

La relativité d'échelle permet, en effet, de simuler la *morphogénèse d'une structure florale* comme la solution d'une équation de la dynamique de croissance sous des conditions de fractalité et d'irréversibilité locale particulières :

« Les formes obtenues auront ainsi tendance à passer d'un plan d'organisation à un autre plutôt que de se déformer de manière continue. Nottale en 2001 a pu décrire un processus de croissance à partir d'un centre, avec une brisure de symétrie haut-bas et avec une force constante dirigée vers le bas. Les pétales, les sépales et les étamines émergent tous de la même solution et sont tracés suivant les angles de probabilité maximale (fig. 1.22 ; voir aussi la fig. 4.24). Cette structure florale existe dans la nature, ce sont les fleurs d'un arbre appelé le *Tulipier de Virginie* (*Liriodendron tulipifera*), une magnoliacée. En inversant le paramètre de la force constante dans l'équation de Schrödinger, Nottale a obtenu une courbure des pétales (fig. 2.14 en haut). Or cette morphologie existe dans la nature, c'est celle d'une fleur banale de nos jardins, la campanule à grandes fleurs *Platycodon* (*Platycodon grandiflorus* ou *grandiflora*) ; Campanulacée originaire d'Extrême-Orient (fig. 2.14 en bas). Ce qui est étonnant dans cette simulation mathématique (fig. 4.24), c'est que les changements de paramètres réalisés aboutissent à deux fleurs appartenant à des familles différentes et très éloignées phylogénétiquement »²⁹

²⁸ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 53-54.

²⁹ NOTTALE, CHALINE, GROU, *Des Fleurs pour Schrödinger*, Paris, Hachette, 2009, p. 189.

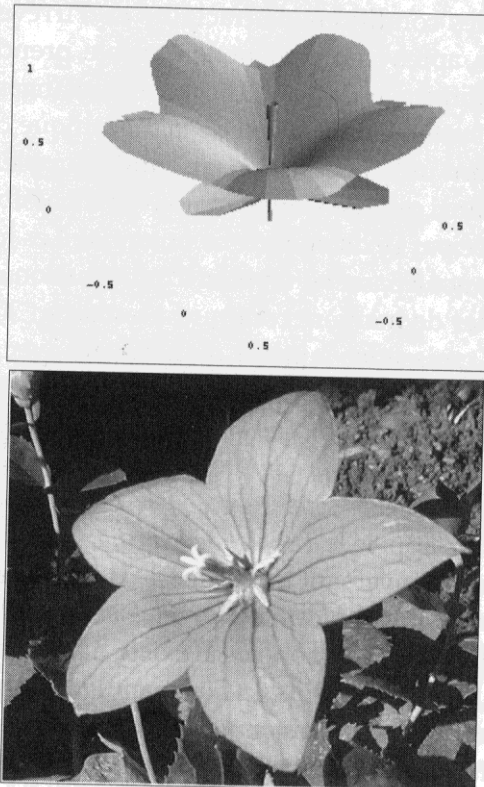


Figure 2.14. Simulation d'une Campanule à grandes fleurs, *Platycodon* (*Platycodon grandiflorus* ou *grandiflora*) et sa réalisation dans la nature.
 En haut, solution d'une « équation de Schrödinger » décrivant un processus de croissance à partir d'un centre avec une brisure de symétrie haut-bas et une force constante vers le bas. Les pétales, sépales et étamines émergent tous de la même solution et sont tracés suivant les angles de probabilité maximale. Ici, la force constante de tension a été inversée ce qui détermine une courbure (d'après Nottale, 2001). En bas, la fleur de *Platycodon* de nos jardins ressemblant au modèle théorique (© cliché J. Chaline).

De tels résultats suggèrent que l'ontogenèse du vivant ne dépend pas uniquement du génotype mais aussi de surdéterminations correspondant aux contraintes que l'existence de relations universelles d'échelles fait peser sur l'expression de ces gènes et sur l'individuation biologique qui en résulte. La théorie de l'individuation trouverait sans doute aussi matière à réflexion dans les travaux de Nottale et Chaline sur l'évolution des lignées biologiques (en particulier sur l'importance des homéo-boîtes pour les réorganisations récurrentes du plan d'organisation du vivant).