2 juin 05

Stabilité et Variabilité : une interprétation dynamique de l’acquisition des concepts scientifiques

Mercês Sousa Ramos, Escola Superior de Educação de Lisboa
Instituto Politécnico - Lisbonne
mercesr@eselx.ipl.pt

Résumé

Lorsque l’on enseigne les sciences, on prétend qu’il se produise un changement de conceptions chez l’élève. Dans la dynamique non linéaire, le changement est inévitable lorsque l’on fait varier les paramètres de contrôle. Nous chercherons à montrer, en utilisant la théorie des systèmes dynamiques complexes (non linéaires), que l’acquisition des concepts scientifiques comporte de successifs changements de conceptions intermédiaires entre le sens commun et le savoir scientifique. Nous montrerons qu’il y a simultanément stabilité (dans le patron de comportement global) et variabilité (dans l’adéquation à chaque situation particulière). Nous interpréterons les résultats fournis dans la lignée de la recherche des « conceptions alternatives » et nous présenterons une perspective sur les potentialités de l’application de cette théorie dans la définition de stratégies d’apprentissage.

1. une question centrale dans l’apprentissage des sciences

Ce que l’on prétend, lorsque l’on enseigne les sciences, c’est qu’il se produise un changement de conceptions, du sens commun à la connaissance scientifique. Cependant, il est amplement reconnu et divulgué par les recherches sur les conceptions alternatives et constaté dans la pratique que les élèves ont, sur le monde, des idées partagées et acceptées par la communauté dans laquelle ils vivent, difficiles à changer. Ces recherches ont clairement montré que les élèves possèdent et développent des «conceptions erronées», du point de vue scientifique, qui interfèrent avec les objectifs de l’éducation scientifique, ces conceptions semblent persister même après l’enseignement formel. Malgré les progrès de la recherche éducationnelle, les améliorations dans les apprentissages des élèves, globalement, ne semblent pas significatives comme le démontrent les rapports sur la littératie scientifique. C’est à dire que l’école ne remplit pas sa fonction dans l’éducation scientifique des citoyens.

La non-linéarité de l’acquisition d’une connaissance

Les résultats mentionnés par Duit et al. semblent montrer que l’acquisition d’une connaissance est un phénomène de nature complexe: *“… les conceptions finales des élèves ne sont pas les conceptions scientifiques prétendues mais des intermédiaires.*” (1998: 1071). Une situation similaire est référée par Van Geert (1994: 128-130), dans le cas de l’acquisition du principe de conservation de la matière. Certains enfants (17%), qui dans une première session, manifestent la conservation, lors d’une séance postérieure se révèlent être à un stade intermédiaire. *“La …*

conclusion qui peut être tirée ... est que, certains enfants, se déplacent d'un état stable (non-conservation) à un état non stable, qui est une fluctuation entre deux ou plusieurs états possibles…Finalement ils se fixent à un état stable, la compréhension de la conservation." (Bijstra, Van Geert et Jackson, cité par Van Geert, ibid.:129). Selon l'auteur, l'acquisition de ce principe, durant le développement est un processus non linéaire.

Le relevé des conceptions de thermodynamique, réalisé (Ramos, 2001) avant l'enseignement formel, dans la discipline de physique, au cours de la deuxième année de formation d'enseignants, est globalement en accord avec les résultats de la recherche éducationnelle et montre que, lorsqu'ils arrivent dans l'enseignement supérieur, les élèves différencient mal certains concepts dont l'appropriation est la base pour l'acquisition d'autres concepts, et qu'ils présentent encore des conceptions de sens commun (ibid., 3.1 et 3.2). Cependant, de l'analyse comparative des réponses à des questions posées durant et après les enseignements de physique, émergent certains aspects intéressants sur la connaissance exprimée par les élèves (ibid., 3.3 et 4): (a) la majorité des conceptions alternatives ne se maintiennent pas identiques à celles détectées initialement, mais ce ne sont pas les scientifiques, actuellement acceptées (et enseignées) qui priment mais des situations intermédiaires (à plusieurs niveaux); (b) des conceptions de niveau différent[1] peuvent être présentées pour le même concept, par le même élève, suivant la situation dans laquelle il est utilisé; (c) l'argumentation présente des fragilités ou même des contradictions incorporant des conceptions/idées de niveau différent.

La constatation qu'un même élève manifeste une gradation de conceptions en fonction de la situation concrète et la fragilité de l'argumentation montrent que l'apprentissage de la connaissance scientifique ne peut pas être réduit à la dichotomie connaît/ne connaît pas ou possède une conception alternative/possède une conception scientifique. Il s'agit d'un processus évolutif avec des avancées et des reculs et des sauts, se réalisant de façon **non linéaire**.

L'inévitabilité d'une meilleure « rationalisation » de la recherche en éducation

L'échec dans l'apprentissage a conduit à une remise en cause des bases de la recherche éducationnelle, tout d'abord des recherches sur les conceptions alternatives et ensuite des modèles de changement conceptuel. Par exemple, Roth (1998) considère qu'une grande partie de la recherche "*n'étudie pas le changement «per si», mais infère, souvent à partir d'entretiens… Ce qui fait défaut est la description de* ***trajectoires d'apprentissage*** *suivant les élèves, de la compréhension préalable à l'instruction à celle postérieure à l'instruction, sur un topique particulier*." Pour Roth, la contribution de ce type de recherche pour la théorie de l'apprentissage requiert peu d'inférences et présente des perspectives stimulantes pour le changement de nature de la recherche en éducation en science. Nous pensons, nous aussi, qu'il devrait se produire un changement dans la façon d'envisager la recherche en éducation. Néanmoins, l'obtention de données empiriques plus détaillées et plus rigoureuses constitue-t-elle le changement nécessaire? A notre avis, le changement à opérer en éducation devrait être de même nature que celui défendu par Bachelard (1976), qui a eu lieu en physique, en vue d'une plus grande rationalisation. Selon lui, la mathématisation est fondamentale pour une compréhension plus profonde des phénomènes. Mais comment mathématiser les phénomènes éducatifs ? Reconnaître que les phénomènes d'apprentissage sont non linéaires peut avoir tous les avantages. Dans la dynamique non linéaire, le changement est inévitable quand on fait varier les paramètres de contrôle et le changement (de conceptions) est ce que nous souhaitons qu'il se passe dans l'école.

2. La théorie du chaos – une possibilité de mathématisation en éducation

Le changement de perspectives dans l'étude des phénomènes éducatifs (dans le sens d'une rationalisation à la Bachelard), il y a bien peu de temps, n'était pas possible car il n'existait pas de modèles mathématiques adéquats. Cependant, dans les années 60, a débuté une nouvelle manière d'envisager l'étude des *systèmes physiques*, basée sur des modèles mathématiques de *la théorie des systèmes dynamiques non liné*aires, ordinairement connue sous le nom de *théorie du chaos*. Cette théorie permet d'aborder des phénomènes qui mettent en évidence des comportements non réguliers, apériodiques et complexes. C'est ainsi que surgit la possibilité d'étudier, d'interpréter et comprendre ce qui est apparemment non régulier ou complexe dans toutes les sciences. [2]

Si le processus d'acquisition de connaissances n'est pas linéaire, pourquoi ne pas utiliser la théorie du chaos pour interpréter les résultats de la recherche empirique éducationnelle[3], pour une compréhension plus profonde de ce qui, dans l'essentiel, est en jeu dans le phénomène d'apprentissage d'un contenu.

Certains concepts et caractéristiques des systèmes chaotiques

Chaos, en sciences, traduit le comportement non régulier ou apériodique et imprévisible de systèmes qui suivent une dynamique non linéaire, décrite par des équations déterministiques. Pour introduire certains concepts, nous utiliserons comme système un pendule.

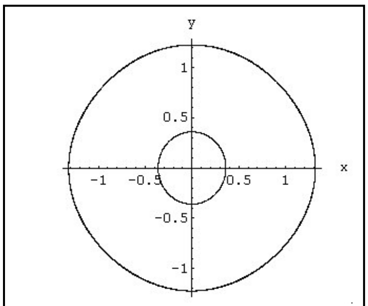

Figure 1: Trajectoires dans l'espace de phase (θ représenté par x et ω par y).

La dynamique du pendule : du régulier au chaotique

i) Supposons qu'il soit possible d'éliminer le frottement. Eloigné de la position d'équilibre, le pendule oscillera perpétuellement autour de cette position. Le pendule a un mouvement **périodique**. Le mouvement du pendule (comportement dynamique) peut être décrit par l'angle θ et par la vitesse angulaire, ω. Les variables θ et ω définissent **l'espace de phase**. Dans l'espace de phase, l'état du système est représenté par un point et son évolution avec le temps par une ligne – la trajectoire ou orbite. Dans ce cas, c'est un cercle.

ii) En général, il y a frottement. Si on éloigne le pendule de sa position d'équilibre, il oscillera autour de cette position et finira par s'arrêter. L'équilibre est un **attracteur** dynamique du pendule. Dans l'espace de phase, le point représentatif décrit une courbe qui tend toujours vers le même point, le **point fixe**.

iii) Appliquant au pendule sujet au frottement une force extérieure constante, par exemple, celle d'un ressort, la trajectoire dans l'espace de phase est un cercle, indépendamment de l'endroit où elle commence. Le cercle est également un attracteur, nommé **cycle limite**. Cependant, dans certaines conditions initiales- celles de moindre énergie, le pendule s'arrêtera. Le mouvement du pendule, dans ce cas, a deux types d'attracteurs (le **cycle limite** et le **point fixe**).

iv) Au pendule sujet au frottement, nous pouvons appliquer une force d'impulsion variable – dans ce cas, puisqu'il existe un terme non linéaire, la dynamique est variée ; son étude nous oblige à avoir recours à des techniques mathématiques de la théorie des systèmes non linéaires ou chaotiques.

Comme modèle interprétatif des résultats de la recherche au sujet de l'apprentissage de concepts, il nous a semblé intéressant d'utiliser les **diagrammes de bifurcation** (db)[4]. Un db consiste à représenter, l'un des paramètres étant fixe, une des variables du système en fonction de l'autre paramètre et permet de visualiser la succession de changements dans la dynamique du système (figure 2).

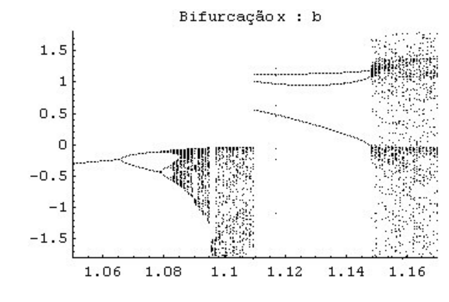

Figure 2: diagramme de bifurcation, **a** =0.5

3. Les bifurcations dans l'évolution du système

D'une manière générale, pour qu'il y ait chaos, ce qui est important est que le système soit sujet à au moins deux paramètres dont les actions ont des effets contraires. L'évolution de son comportement dynamique, c'est à dire les valeurs prises par les variables du mouvement, θ et ω, dépendra du jeu entre les valeurs des paramètres, frottement, **a**, et force, **b**. Par analogie, nous pourrons interpréter ce qui se passe dans les phénomènes liés à l'acquisition de concepts.

Nous avons fixé **a** et nous avons observé ce qui arrive à θ lorsque **b** varie (Ramos, 2001). La valeur de θ, comme nous pouvons le voir sur la figure 2, augmente lentement quand b augmente jusqu'à des valeurs <1.066. Dans l'espace de phase, pour b <1.066, nous obtenons une orbite à peu près elliptique – figure 3. Dans cette région, le mouvement du pendule est périodique (période 1), avec la fréquence de la force et avec l'amplitude résultante du balancement entre la force d'impulsion et le frottement. Quelles que soient les conditions initiales, on obtient toujours le même type d'orbite. L'orbite est un cycle limite. Quand b =1.066, θ prend deux valeurs, la ligne se dédouble en deux – il y a **bifurcation**. Dans l'espace de phase, on visualise une orbite avec deux tours, c'est à dire, le pendule ne reprend la même position qu'à la fin d'une période double. L'orbite est toujours périodique, de période deux, il y a eu duplication de la période. L'orbite antérieure s'est déstabilisée devenant répulsive et, bien que non représentée sur le db, elle continue à exister. Pour un certain intervalle de valeurs du paramètre b, l'orbite qui représente l'état du système se maintient périodique, avec une période double de la précédente.

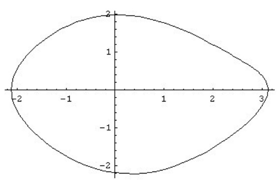

Figura 3: b = 1.064

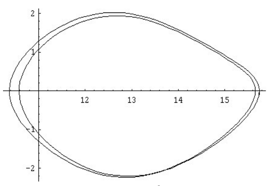

Figura 4: b =1.066

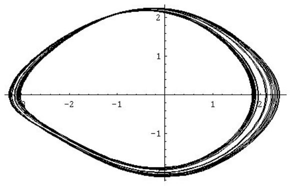

Figura 5: b =1. 084

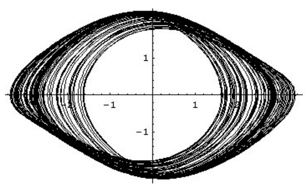

Figura 6

Quand on continue à augmenter la valeur de b, il y a duplications de période : 4, 8, 16, 32,… . Les duplications se prolongent à l'infini. Le système présente de nombreuses orbites périodiques, très proches les unes des autres. Pour des valeurs de b suffisamment élevées, l'orbite devient une figure plus compliquée. La trajectoire est **apériodique**. Le pendule entre dans un ***régime chaotique***, après avoir fait un **nombre infini** de duplications de période. Pour b=1.084, on obtient la figure 5. Si on augmente b, la représentation de l'espace de phase, figure 6, devient une figure embrouillée. Dans le db, nous pouvons voir : les successifs changements de comportement déterminés par la variation du paramètre b ; des zones de comportement périodique intercalées par des orbites apériodiques. A chaque bifurcation, toutes les orbites qui se sont déstabilisées, bien que non représentées sur le graphique, continuent à exister. Donc, il y a un nombre infini d'orbites et le système présente un **comportement chaotique**. Les valeurs attribuées aux paramètres déterminent que le comportement passe, progressivement, du régulier au chaotique (complexe). C'est le comportement temporel du système à long terme ($t \to \infty$) qui distingue le comportement régulier du chaotique. Bien que d'irrégularité apparente, un système chaotique présente une régularité dans le patron global de comportement – la succession de bifurcations ; l'apparente irrégularité cache des ordres[5] bien déterminés.

4. Une application de la théorie du chaos

Variables et paramètres de contrôle

La connaissance que tout élève possède quand il entre à l'école devra évoluer avec le temps. Pour connaître la dynamique de cette évolution, il faut définir les variables du système et les paramètres de contrôle qui globalement définiront son évolution, dans un certain champ de savoir. D'après ce qui a été dit en 3, nous pouvons considérer que le système dynamique connaissance individuelle est sujet à deux paramètres avec des actions opposées, semblables à celles des paramètres **a** et **b** pour le pendule : la résistance à l'apprentissage due à l'action du milieu (des actions de plusieurs facteurs à discriminer postérieurement sont ici contenues), désignée par **m;** la force pour l'acquisition de connaissance scientifique, due à l'école, **e** (dans laquelle sont également contenues les actions de plusieurs facteurs). L'éducation scientifique visant à ce que l'élève passe du niveau de compréhension de sens commun à une connaissance scientifique et qu'il l'utilise un plus grand nombre de fois possible, nous avons considéré que les variables pour décrire le système pouvait être: le niveau de compréhension **c**; et le niveau d'utilisation **u**. Par analogie (et non pas identification) avec la dynamique du pendule, voyons comment du jeu entre les paramètres surgissent les résultats de la recherche.

Les bifurcations et les états de connaissance (conceptions) des élèves

Considérons que **m** se maintient approximativement constant, pour un certain champ de connaissance. Si nous attribuons à l'action de l'école, **e**, une valeur proche de zéro, la connaissance du sujet perturbée par une information scientifique, rapidement tendra vers le sens commun – l'attracteur de la dynamique du système. Si nous augmentons **e** d'une petite valeur, le système tendra encore vers l'attracteur de sens commun (équivalent au point fixe du pendule). Plus **e** est grand, plus le système met de temps à revenir au sens commun, jusqu'à ce que, pour une certaine valeur, il se produise une bifurcation. La connaissance antérieure se déstabilise, une connaissance avec de nouvelles caractéristiques émerge. Le sens commun n'est plus l'attracteur de la connaissance. La permanence de conceptions de sens commun, amplement confirmée par les données empiriques, vient du fait que la valeur de **e** n'est pas suffisamment élevée pour provoquer le changement. Cette bifurcation correspond-elle à l'acquisition de connaissance scientifique? La première bifurcation dans la connaissance acquise signifie que l'attracteur n'est plus le sens commun mais, en général, ce n'est pas encore la connaissance scientifique. L'attracteur pourra exhiber des caractéristiques communes aux deux, voire d'autres. La production de “conceptions erronées », résultantes des interactions entre les conceptions de sens commun et ce qui est enseigné à l'école, est largement confirmée par les recherches. L'existence de zones d'instabilité, de transition entre une connaissance et une autre, peut expliquer l'«oscillation» des élèves, d'une explication à une autre suivant la situation, puisqu'il suffit d'une petite perturbation pour changer l'attracteur de connaissance (voyons ce qui se passe avec le pendule). Par exemple, relativement au concept chaleur: un même élève, dans un contexte, peut le considérer comme la mesure du transfert d'énergie entre des corps qui entrent en contact à des températures différentes, dans un autre, comme contenu énergétique d'un corps, ou encore comme ayant une nature matérielle (Ramos, 2001). D'un autre côté, chaque fois qu'il y a bifurcation, le système exhibe une nouvelle orbite (nouveau type de connaissance). Cependant, l'orbite correspondant à la connaissance antérieure qui s'est déstabilisée, est devenue répulsive mais n'a pas disparu. Ainsi, toutes les orbites déstabilisées, bien que répulsives, continuent à exister, elles peuvent, donc, se manifester. Il est également explicable qu'une connaissance acquise soit correctement utilisée dans le contexte de la salle de classe mais, ne le soit pas dans un autre contexte. Dans ce cas, pour une valeur donnée de **e**, **m** prend une valeur supérieure de sorte que le sens commun devient l'attracteur de connaissance.

Du jeu entre les valeurs de **m** et de **e**, pour un certain domaine, peuvent surgir de nombreux attracteurs, avec des degrés différents de proximité à la connaissance scientifique, jusqu'à ce que l'action de l'école, **e**, détermine comme attracteur la connaissance scientifique, pour ce domaine. Donc, comme attracteurs de connaissance, il n'y a pas seulement le sens commun et la connaissance scientifique – de la même façon que pour l'acquisition du principe de la conservation dans le développement cognitif peuvent surgir de multiples attracteurs (comme le mentionne Van Geert déjà cité).

Les bifurcations et l'acquisition de concepts

Dans le db, l'existence de petites fenêtres périodiques intercalées par des orbites apériodiques peuvent correspondre à l'acquisition de concepts. C'est lorsque **e** atteint une certaine valeur (pour un **m** donné) que les orbites deviennent apériodiques. Pour une meilleure compréhension, considérons les portraits de phase. Au comportement apériodique correspond une trajectoire qui est représentée, dans l'espace de phase, par une figure extrêmement embrouillée, pliée sur elle-même. Ce qui signifie que le système passe par de nombreux états qui ne se répètent pas – l'attracteur dynamique est un **attracteur étrange**[6]. Ces différents états coopèrent collectivement à l'émergence d'un état de connaissance de plus grande complexité. L'acquisition de concepts se manifestera par son applicabilité à des situations très diverses et traduira l'adaptabilité (**variabilité**) du système à la nature de la situation ou problème[7]. Un état de connaissance de plus grande complexité ne peut émerger qu'après l'existence d'un comportement apériodique. Plus la complexité du système est grande plus le nombre de situations différentes qu'il est possible d'expliquer et de résoudre correctement est grand ("variabilité locale » élevée), il y a alors une plus grande stabilité dans la connaissance scientifique acquise, comme cela est également mentionné par Smith (1995: 53-72) pour l'attribution de sens aux mots, par les enfants qui "exhibe aussi bien une structure globale stable qu'une adaptabilité locale… ».

Conséquences pour l'enseignement

Le **db** donne une vision des dynamiques d'un système, quel qu'il soit. La succession de bifurcations bien déterminée (définie par les dynamiques) montre qu'il y a des états qui sont antérieurs à d'autres. Ainsi, pour chaque champ de savoir, l'acquisition de connaissance possède des ordres de hiérarchisation bien définis. Cette conclusion théorique vient corroborer la constatation référée par Vosniadou et Ioannides qui affirme que « les concepts qui comprennent le contenu d'un thème ont une structure relationnelle qui influence leur ordre d'acquisition » (1998: 1223). Cependant, pour qu'aient lieu les changements (apprentissage), les paramètres doivent prendre des valeurs bien déterminées. Une des orientations de la recherche devra aller dans le sens d'une caractérisation des paramètres qui déterminent l'acquisition d'une connaissance scientifique. La théorie du chaos peut nous orienter dans l'identification de telles caractéristiques (entre autres méthodologies, les séquences d'apprentissage) par le calcul de l'entropie associée à une connaissance.

Bibliographie

- Bachelard, G., 1976, Filosofia do Novo Espírito Científico. Lisboa: Editorial Presença.
- Duit, R., Roth, W-M, Komorek, M. e Wilbers*, J. 1998,* Conceptual change cum discourse analysis to understand cognition in a unit on chaotic systems: towardds an integrative perspective on learning in science*, Int. J. of Sci. Ed., 20,9, 1059-1073.*
- Ramos, M., 2001, A entropia como medida da complexidade e estabilidade do conhecimento em contextos de ensino e aprendizagem. Universidade de Lisboa: Tese de doutoramento.
- Roth, W-M., 1998, Learning process studies: examples from physics, Int. J. of Science Education, 20, 9, 1019-1024.
- Smith, L.B., 1995, Stability and Variability: The Geometry of Children's Novel-Word Interpretations, in *Chaos Theory in Psychology*, 53-72. Londres: Praeger.
- Vosniadou e Ioannides, 1998, From conceptual development to science education: a psychological point of view, *In. J. of Sc. Ed.*, 20, 10, 1151-1154.

[1] Elles peuvent être de nature animiste, de sens commun, scientifiques ou intermédiaires entre le sens commun et la scientifique.
[2] Actuellement, un développement énorme de la recherche dans des domaines proches de l'éducation, comme dans les neurosciences et dans les réseaux neuronaux, se vérifie. Par exemple: P. Andras, 2003, Comparing neurophysiological measurements of simulated and real brain in *Neurocomputing*, 677-682 ; H. Fujii et I. Tsuda, 2004, Neocortical gap juntion-coupled interneuron systems may induce chaotic behavior itinerant among quasi-attractors exhibiting transient synchrony in *Neurocomputing,* 151-157, M. Courbage et al. 2005, Emergence of chaotic attractor and anti-synchronization for two coupled monostable neurons in *Chaos*, 14,4, 1148-1156.
[3] Nous avons vérifié qu'il est possible et que cela a un sens d'avoir recours à la théorie du chaos pour « évaluer » l'acquisition de concepts thermodynamiques, en calculant l'entropie associée à une connaissance (Ramos, 2001).
[4] Il existe d'autres techniques, par exemple, Poincaré a proposé une technique, appelée aujourd'hui la *section de Poincaré*, dans le traité « *Méthodes nouvelles de la mécanique céleste* » en 1899.
[5] L'existence d'un ordre dans le chaos a été démontrée par Sharkovsky en 1963.
[6] A une plus grande complexité correspond une plus grande valeur de l'entropie topologique.
[7] Exemple: l'utilisation du concept de conductivité pour expliquer l'échauffement de l'extrémité d'une cuillère plongée dans de l'eau en ébullition, l'utilisation d'un pull de laine en hiver ; le vide dans une bouteille thermique, …