



HAL
open science

Journée AREMIF 2012 : Simulation et Complexité, notions et méthodes.

Olivier Maurice

► **To cite this version:**

Olivier Maurice. Journée AREMIF 2012 : Simulation et Complexité, notions et méthodes.. Journée AREMIF 2012 : simulation électromagnétique et complexité : avancées et défis, Mar 2012, Paris, France. hal-00677841v2

HAL Id: hal-00677841

<https://hal.science/hal-00677841v2>

Submitted on 15 Mar 2012

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.

Journée AREMIF 2012 : Simulation & Complexité, notions & méthodes

Olivier Maurice - GERAC

15 mars 2012

3 avenue Jean d'Alembert. 78190 Trappes. olivier.maurice@gerac.com

Résumé

Cet article rassemble les idées présentées lors d'une session d'introduction aux journées 2012 de l'AREMIF "Simulation électromagnétique et complexité : avancées et défis". La complexité revêt plusieurs sens suivant ses utilisateurs. Mais dans tous les cas elle sous-entend une notion de difficulté, d'enchevêtrement. Après avoir évoqué le sens le plus direct de la complexité pour la simulation, à savoir l'impossibilité de résoudre des problèmes de par leurs caractères dimensionnels, nous abordons les sujets traités par la communauté des systémiciens, initiée entre autres par Norbert Wiener dans le cadre de ses travaux sur la cybernétique¹. Elle analyse la notion de complexité et celle de système qui lui a rapidement été liée sous un angle plus large, non restreint à la seule dimension. Ces approches sont venues en contradiction des acquis du discours de la méthode². La méthode de Descartes a constitué un pas considérable dans la démarche scientifique, qui s'est ensuite enrichie avec les travaux d'autres chercheurs comme Pasteur³. Mais la science progressant, on s'est aperçu que la vision cartésienne est par trop incisive de la réalité qui doit se concevoir comme un ensemble et non un simple puzzle. Ce nouveau regard amène à tenter de nouvelles approches de la complexité, mais qui s'avèrent elles-mêmes plus complexes, ou disons certainement plus compliquées. Nous donnons ici quelques uns des fondements établis en systémique⁴ et nous en présentons quelques applications d'abord illustratives puis plus formelles en général et en particulier en électromagnétisme⁵.

1 L'approche cartésienne

Face à un problème, le scientifique un tant soit peu méthodique va suivre 4 étapes :

-
1. Cybernetics or Control and Communication in the Animal. 1961
 2. œuvre de Descartes récemment rééditée, entre autre chez Folio
 3. Dans le cadre de notre réflexion Pasteur apporte deux contributions : d'un côté sa méthode scientifique toujours d'actualité, d'un autre côté la vision cartésienne de l'immunité qui rentre dans les exemples de sources de questionnements insufflés par la systémique.
 4. Jean-Louis Lemoigne : "La modélisation des systèmes complexes" chez Dunod.
 5. La communauté des systémiciens est représentée en France, entre autre, par l'association AFSCET : www.afscet.asso.fr

1. poser le problème ;
2. préciser les hypothèses ;
3. s'appuyer sur une théorie, une structure algébrique, logique, etc., pour effectuer des opérations, réflexions argumentées, ...
4. en déduire des solutions possibles au problème.

En soit, ces étapes sont assez générales pour être suivies dans des domaines extrêmement variés. Mais par cette séquence, on suppose que le scientifique peut réaliser une projection de sa vision du problème sur une structure de raisonnement qui le conduise à une forme de solution. Cette projection dans la démarche classique, passe par un découpage du problème en parties plus simples, une réduction de la complexité que l'on admet tacitement acceptable. Le second précepte de Descartes est : "... de diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour les mieux résoudre."

2 La complexité dans le cadre cartésien : enchevêtrements et aléas

En considérant une topologie discrète - un graphe constitué de N nœuds, on peut vouloir dans cette topologie résoudre différents problèmes, par exemple déterminer si l'on peut colorier les nœuds avec trois couleurs, sans jamais qu'il y ait deux nœuds contigus de même couleur. Lorsque l'on veut résoudre ces types de problèmes, on trouve une classe P d'entre eux qui se résout numériquement dans un temps proportionnel à N^2 ou N^3 , etc. D'autres classes de problèmes nécessitent des temps exponentiels ou leur durée de simulation est non déterministe (elle peut être très courte si l'on a de la chance, ou au contraire infiniment longue). Ces autres classes sont dites "NP" pour "non déterministe, polynomial ; ou formellement non-polynomial"⁶. Une question majeure posée par l'institut Clay de mathématiques (un des 7 problèmes posés par l'institut) est de savoir si l'on peut trouver des algorithmes qui permettent de résoudre les problèmes de la classe "NP" de façon déterministe ou polynomiale, c'est à dire "P". Soit parfois de remplacer la chance par un calcul intelligent. La conjecture "P=NP" ainsi posée constitue un cas très appliqué de complexité. Nous y trouvons certains des ingrédients qui font partie des définitions de la complexité, à savoir :

1. un aspect aléatoire - en tout cas tant que d'autres voies ne sont pas trouvées qui contrediraient cet aspect ;
2. un enchevêtrement dans la majorité de ces problèmes : par exemple celui de trouver si l'on peut colorier les nœuds sans adjacence de couleurs d'un graphe de N nœuds, pour C couleurs. Evidemment pour un graphe simple on trouve rapidement la solution (une solution ...), ce n'est pas le même problème pour des graphes où N est grand.

Pourtant comme on le voit pour le problème cité, ces cas "NP" partent de briques élémentaires très simples. La complexité apparaît avec la multiplication des masses et des possibilités. On peut donc déjà mentionner que le volume des possibles constitue en soit une source de complexité. Mais si cette définition est

6. Un dossier du journal "pour la science" a traité ce sujet : n°74 Janvier - Mars 2012.

acceptable, elle ne couvre pas tous les cas envisagés ; elle n'est ni nécessaire ni suffisante. Pour certains, comme nous le verrons un peu plus loin, la complexité revêt des caractères supplémentaires. Les "NP" restent des problèmes compliqués, mais qui seront résolus un jour. Après, d'autres dont des mathématiciens, pensent que ces problèmes ne seront pas résolus avant des dizaines d'années, en faisant appel à des idées radicalement nouvelles (je cite ici un extrait de l'article du dossier "pour la science").

3 Réduction de la complexité : systèmes sans pertes, linéaires, contrôlés

Il est vrai que d'une manière générale, la vie de tous les jours regorge de ces problèmes "NP" complexes. Déjà dans les métiers de l'ingénieur, les physiques sont souvent traitées séparément, les systèmes sont considérés sans pertes, linéaires, etc. Il existe des techniques numériques qui permettent d'aborder des problèmes "réels", mais nous n'en sommes finalement qu'au début, et de constater qu'en électromagnétisme par exemple, les confrontations mesures - calculs dégagent souvent des écarts relativement importants en comparaison d'autres domaines. On peut penser que cela provient de diverses origines : pour aborder la réalité, on a élaboré au cours du temps des réductions de la complexité dont on use couramment, en ayant souvent oublié leur existence. Ainsi concernant les équations de Maxwell, pour citer Einstein : "Les équations de Maxwell déterminent le champ électromagnétique, si la distribution des charges et des courants électriques est connue. Mais les lois qui régissent les comportements des courants et des charges ne nous sont pas connues⁷". Certes des progrès, principalement en théorie quantique des champs, ont été accomplis depuis, mais le lien reste difficile. Les équations de Maxwell couplées à celle de Lorentz donnent les impulsions imprimées aux particules par le champ, mais sous certaines conditions de confinement, des ajustement quantiques peuvent être nécessaires, etc. Bref, les hypothèses de degrés de liberté de circulation des charges limités par les conducteurs facilitent la tâche (bien que les problèmes d'électrostatique restent difficiles à résoudre) mais les meilleures précisions tournent autour du dixième de pourcentage et plus couramment autour du décibel ! Certains problèmes comme la détermination des géodésiques de courant sur une antenne cylindrique épaisse restent difficiles. Enfin, dans de nombreux problèmes, la prise en compte des pertes liées aux circulations de courants dans les parois reste très approximative.

Une dernière anecdote éclairera les limites évidentes de validité des codes de simulations électromagnétiques. Il y a quelques années je faisais partie d'un jury d'une thèse portant sur le couplage d'une onde électromagnétique sur un boîtier muni d'une fente très fine, en utilisant une technique numérique en éléments finis. Les équations de Maxwell n'y subissaient d'autres approximations que leur numérisation. Pourtant comme on l'a souligné précédemment, ces équations ne sont que les équations du champ. Ainsi on trouvait, en intégrant, une différence de potentiels de 100 kV aux bornes de la fente qui faisait de l'ordre du millimètre. Dans la réalité, un arc se créerait qui arracherait des électrons

7. Einstein : Quatre conférences sur la théorie de la relativité à l'université de Princeton en 1921

et court-circuiterait la fente... La réalité est toujours complexe et sa linéarité est toujours limitée! La nature aime les pertes car elle n'admet pas un domaine d'énergie illimité. Le domaine temporel des systèmes réels est de durée de vie finie (même pour les plus longues périodes comme les périodes de stabilité atomique).

Les non linéarités sont souvent engendrées soit par des changements d'états, soit par des dispositifs à réaction ou contre réaction. Les "boucles" sont des éléments qui interviennent dans les systèmes complexes. Elles assurent la régulation des comportements, mais sous certaines contraintes, ces mêmes régulations peuvent au contraire accélérer des dégradations. Les personnes allergiques en souffrent tous les jours. Tout électronicien connaît l'effet Larsen. Pourtant les techniques de rétrocontrôle sont incontournables dans les systèmes évolués. Mais ils sont difficiles à modéliser, dépendant parfois de paramètres fins et nombreux. Un oscillateur sous SPICE ne "démarré" pas seul. Dans la réalité, quelques bruits suffisent à l'exciter. Pour concevoir des systèmes évolués - imaginons une voiture du futur en matériaux organiques propulsée par un moteur ionique et glissant pratiquement sans frottements sur un substrat écologique comme les Gerris se déplacent sur l'eau - on sera amené à construire des structures et des électroniques fortement imbriquées les unes dans les autres, tendant vers les mécanismes biologiques. Ces mécanismes ultra-adaptatifs, ultra-optimisés ont multipliés la répartition de l'intelligence avec des traitements répartis, interconnectés et pilotés par un système nerveux central pourvu d'une unité dont on discutera de la puissance. L'atteinte à l'intégrité de ces systèmes complexes en un point peut suffire à affecter toute une partie du système et ces oscillateurs effectifs ou potentiels peuvent par des modifications apparemment non significatives de conditions initiales passer de l'état stable au chaos. La biologie et demain la *bioélectronique* sont des domaines où l'on voit rapidement les limites des approches cartésiennes. En découpant le système sans autres précautions, on casse des interactions, des boucles, et l'on détruit irrémédiablement certaines facettes de son fonctionnement.

4 Fermetures : la démarche adiabatique et la stochasticité de l'environnement

Après l'absence de pertes, c'est l'isolement qui est souvent de rigueur dans nos formations scolaires! Dans la démarche cartésienne de division pour simplifier, l'environnement est rapidement "évacué" pour centrer l'analyse sur un domaine limité dans l'espace. Ainsi en compatibilité électromagnétique, les tests sur équipements sont effectués à température ambiante. Pourtant ces mêmes électroniques sont testées par ailleurs à des ambiances thermiques avec de forts gradients. Comment cela se fait-il? Et bien on a réduit la complexité de la conception en séparant les contraintes. Des marges pallient aux effets combinés (théoriquement, car souvent on ne sait pas les chiffrer!) et la démarche cartésienne conduit à tester et concevoir les électroniques pour chaque contrainte séparément. Il est vrai qu'aujourd'hui cela fonctionne globalement bien, parce que les systèmes que nous concevons sont des monstres de poids, lourdeurs, grossièreté. Ce n'est que récemment que les travaux en biomimétique par exemple, ont invité les ingénieurs à regarder d'un peu plus près la beauté des conceptions

de la nature et ses optimisations. Les prothèses rajoutées en bout d'aile, encore caricaturales, font gagner en consommation et imitent (le terme est fort) les rémiges des grands rapaces⁸. Paradoxalement, on s'aperçoit que c'est un environnement nourrit d'aléatoire qui engendre les innovations dans l'évolution. Ainsi les systèmes vivants qui sont les systèmes les plus complexes sont ouverts et interagissent avec leur environnement et ces interactions sont empreintes d'aléatoire. L'environnement est aléatoire de par là aussi son étendue, l'immensité du nombre de ses constituants, etc. En maîtrisant l'outil l'homme a eu tendance à se couper de son environnement. Il y revient petit à petit, prenant conscience des aspects par trop simplistes des premières approches. Un exemple, qui reste simple, d'impact de l'environnement est le métier d'analyse des sections efficaces radar (SER). La SER d'un objet est une chose, la SER du même objet dans son environnement en est une autre...

Gabriel Kron, un des initiateurs de la topologie électromagnétique, avait compris que le découpage d'un système se devait de garder des informations propres au système complet. On ne peut ici traiter de la "Diakoptic" en quelques lignes. Le mot "Diakoptic" a été inventé par le Professeur Philip Stanley du département de philosophie de l'Union College à New York. Il vient du Grec "kopto" qui signifie découper, partager et du préfixe "dia" qui renforce l'idée de "très partagé". Nous admettons ici que l'évolution (pas forcément linéaire) des flux d'un système entre deux états - dissocié et réuni - s'exprime par une matrice (une métrique dont on s'est doté) qui a la forme suivante (ici pour un ordre 4) :

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\alpha}{a} & 0 & 0 \\ \frac{\alpha}{b} & 1 & \frac{\gamma}{b} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma}{c} & 1 & \frac{\sigma}{c} \\ 0 & 0 & \frac{\sigma}{d} & 1 \end{pmatrix}$$

Les lettres grecques représentent des opérateurs de couplages et les lettres latines des propriétés intrinsèques. Cette matrice traduit l'impact de l'environnement - qui est un système complexe comme un autre - sur un système donné. Si je désire étudier séparément le premier sous-système de dimensions 2x2, associé à la matrice $\begin{pmatrix} 1 & \frac{\alpha}{a} \\ \frac{\alpha}{b} & 1 \end{pmatrix}$, je dois intégrer le couplage γb^{-1} en termes sources. Mais n'oublions pas qu'il ne s'agit pas d'un scalaire mais d'un opérateur qui dépend lui-même du système complet. De fait, je suis obligé de le traiter par des probabilités ou à l'inverse, je traite séparément chaque sous-système, puis je les couple et calcule la variations de flux par l'application de la matrice M (c'est une façon de faire, il y en a d'autres⁹). De nouveau, si je ne sais pas appréhender les couplages de façon déterministe (ce qui est souvent le cas avec les systèmes naturels), j'opérerai de façon probabiliste.

5 Ordinateur et cerveau

En réfléchissant et en se questionnant sur les systèmes de complexité croissante, on en vient tôt ou tard à s'interroger sur le cerveau. Par ailleurs avec

8. On pourra lire les performances de la nature dans l'ouvrage "L'Intelligence de la nature" de Michel Lamy chez les éditions du Rocher.

9. On consultera les travaux de Pr Sohor de l'université de Pskov sur ces techniques appliquées à des outils numériques : <http://diakoptics-fr.narod.ru/>.

les performances croissantes des ordinateurs, l'homme a imaginé pouvoir créer un cerveau artificiel. Mais qu'en est-il¹⁰? En fait les deux structures ne sont pas comparables. Le cerveau est un système complexe. Un ordinateur est un système compliqué. Le premier comporte 10^{11} neurones et 10^4 synapses par neurone avec des connexions directes et volumiques - et même radiatives!. Le second comporte aujourd'hui 10^8 composants binaires. Nous voyons donc qu'il y a un monde entre les deux entités. Non pas tant au niveau des performances pures - l'ordinateur calcule beaucoup plus vite que le cerveau - mais au niveau des capacités d'évolution, d'adaptation, et d'échanges avec l'environnement. le cerveau manipule une information constituée de différentes molécules modulées en quantité et période, et cela conjugué à la perception d'ondes électromagnétiques (de récentes études ont montré que les neurones communiquaient aussi par des ondes de champ électrique dans la cavité corticale). En tenant compte de tous ces facteurs, un calcul grossier donne pour le cerveau le nombre potentiel minimum de 10^{19} états binaires équivalents, voire plus. Cela ressemble à un problème NP complexe! En plus de cela, l'ordinateur aussi puissant soit-il est pauvrement statique et binaire. Le cerveau (celui de tous les animaux) continue d'évoluer à des rythmes différents, suivant son environnement, et des stratégies de la nature qui aujourd'hui nous dépassent. Car l'apparition de la vie reste scientifiquement un mystère, une émergence inexpliquée depuis les débuts supposés de la nature et de l'univers. Car si l'homme peut s'appuyer sur les mathématiques pour consolider ses raisonnements et ne pas tomber dans le mysticisme, il devra un jour comprendre la propre émergence de ces mathématiques.

6 Appréhender la complexité : le dessin de Salvador Dali & la notion d'émergence, la vie!

Nous avons balayé des premiers caractères des systèmes complexes :

1. Aléatoire et enchevêtrement
2. non linéarités
3. ouverture et interactions fortes avec l'environnement

Nous allons maintenant aborder le plus élaboré d'entre eux : l'émergence - ou encore le caractère holistique.

Considérons un ensemble d'éléments, présentés figure 1. On y reconnaît ou pas des personnages, une voute, un sol. On peut rapprocher ces personnages et les coller les uns aux autres pour former l'image d'un marché aux esclaves, donnée figure 2. Mais en prenant un peu de recul et en exploitant toute la puissance de notre cerveau, on reconnaît aussi un portrait de Voltaire. Cette prouesse de Salvador Dali est une magistrale illustration de l'émergence. A partir d'éléments séparés regroupés émerge une nouvelle forme que l'on ne pouvait pas suspecter en chacun des éléments séparés. Ainsi, si l'on observe un être vivant au microscope on observe au plus fin des molécules, des atomes, ..., bref, des entités inertes. Pourtant l'ensemble fait preuve d'autonomie (au sens systémique : capable de reproduction). La vie est sans doute une des émergences

10. Voir "Introduction aux réseaux neuronaux : de la synapse à la psyché" d'Armand Savioz chez de Boeck.

ultimes. Mathématiquement le regroupement et les interactions opérant entre des entités élémentaires revient à des transformations opérées sur des graphes dits “primitifs” (dénomination choisie par Gabriel Kron pour désigner ces entités élémentaires). Autrement dit, pour commencer à parler d’analyse tensorielle des réseaux (ATR, initiée par G.Kron en 1939) qui permet de théoriser les concepts évoqués ici et précédemment, on dispose au départ de N tenseurs fondamentaux rattachés chacun à une entité k élémentaire. Soit g_k ces tenseurs, ils pointent chacun une catégorie (différents types de graphes en topologie discrète et continue). Simplement, ces tenseurs sont des matrices qui portent toutes les propriétés - comportements des entités pour un environnement donné et des choix d’espace de représentation dont on s’est doté.

Après réunion et transformation on constitue un nouveau système qui a son tenseur fondamental fabriqué à partir des N tenseurs élémentaires, comme une réunion. La diagonale de ce nouveau tenseur est la succession des N tenseurs g_k précédents et des termes extra-diagonaux viennent traduire l’adjonction d’interactions entre les éléments. Mais l’émergence recouvre un concept qui est plus que de simples couplages. L’émergence signifie qu’une propriété n’existe qu’au niveau de la réunion et pas au niveau des entités élémentaires. Cela signifie que notre tenseur précédent acquiert une propriété qui n’existe qu’à son niveau et pas au niveau de ses parties, quelle que soit la division que l’on opérerait sur le tenseur assemblé. A la réunion et aux transformations T des $g_k \rightarrow T[\cup_k g_k]$ il faut ajouter un nouvel objet μ qui traduit l’émergence. Comme dans le dessin de Dali, cette propriété peut être relativement cachée, mais, point essentiel, elle ne pourra jamais être retrouvée aux échelles inférieures. On peut prendre des exemples simples en topologie discrète. considérons des segments. Chacun séparément peut être identifié avec des propriétés de longueur, etc. Partant d’un nœud, je peux mettre autant de segments à la queue leu leu que je veux, tant que je ne reviens pas au nœud de départ, le nouveau segment conservera les caractères des segments de départ (même bord, graphe non connexe, caractéristique d’Euler-Poincaré nulle, etc.).

Mais si je reviens au nœud de départ, je fabrique un cercle d’où émerge de nouvelles propriétés : l’absence de bord par exemple (une fourmi peut marcher toujours tout droit sur un cercle sans jamais avoir à faire demi-tour). En électromagnétisme on peut très bien traduire certains de ces effets. Ainsi, toujours dans un contexte de topologie discrète, un tenseur décrit les propriétés de branches : on l’utilise sous une forme réduite dans les outils dits “nodaux” comme SPICE. Mais on peut aussi lui appliquer une transformation pour l’exprimer dans l’espace des mailles où les circulations fermées de branches apparaissent. Dans cet espace, on peut alors définir parfaitement une inductance, ou autrement dit, les effets de circulations fermées du champ électrique le long d’une topologie discrète. Certaines émergences peuvent être déclinées, c’est à dire décomposée pour pouvoir être projetées à une échelle inférieure.

Ainsi, partant du cercle constitué, je peux le redécouper en segment en mémorisant son rayon. En ajoutant cette propriété de rayon aux segments, “j’anticipe” à leur niveau la création du cercle. Mais il s’agit là d’une démarche à rebours : il faut avoir vu l’émergence pour imaginer sa décomposition. Pour les inductances il s’agit du concept d’inductance partielle développé pour SPICE entre autre. Il permet d’accrocher à une branche une valeur d’inductance en réalité attachée à une boucle. L’inductance se retrouve lorsque l’on ferme le circuit par une autre branche sur une autre impédance. Mais on aurait pu dé-

finir le circuit par branche sans inductance, puis ajouter l'inductance dans la représentation des mailles, en la dessinant au centre¹¹.



Figure 1 : ensemble d'éléments variés

Ce n'est pas le propos ici, mais cette représentation comporte de nombreux avantages. La figure 3 montre cette représentation. Un domaine où les émergences sont nombreuses est le domaine atomique. Les interactions entre particules donnent lieu à de nouvelles particules aux nouvelles propriétés. C'est sans doute pourquoi la mécanique quantique est si axiomatique. La modélisation de ces non linéarités absolues est difficile dans une approche d'enchaînement de résultats classiques.

De fait, la physique des particules n'est pas cartésienne. Je ne peux pas "découper" ma particule pour mieux la comprendre. Les aspects discrets des niveaux d'énergie on conduit à la découverte de particules toujours plus nombreuses. Mais il ne s'agit pas d'une discrétisation d'une loi en sous-domaines, mais de rerépartition d'énergies sous des formes variées et dans des réactions identifiées possibles. Notons qu'actuellement les physiciens courent après une particule impliquée dans l'émergence de la masse... Et s'il est une émergence que nous mettrons probablement beaucoup de temps à "formaliser" (sic!) c'est celle de la vie!

Comment synthétiser ce phénomène d'émergence? Littéralement je proposerais : "phénomène observable à une échelle donnée et inobservable exactement à une échelle inférieure. Mathématiquement c'est plus difficile.

11. Représentation proposée dans "La CEM des systèmes complexes" de l'auteur chez Hermès-Sciences.

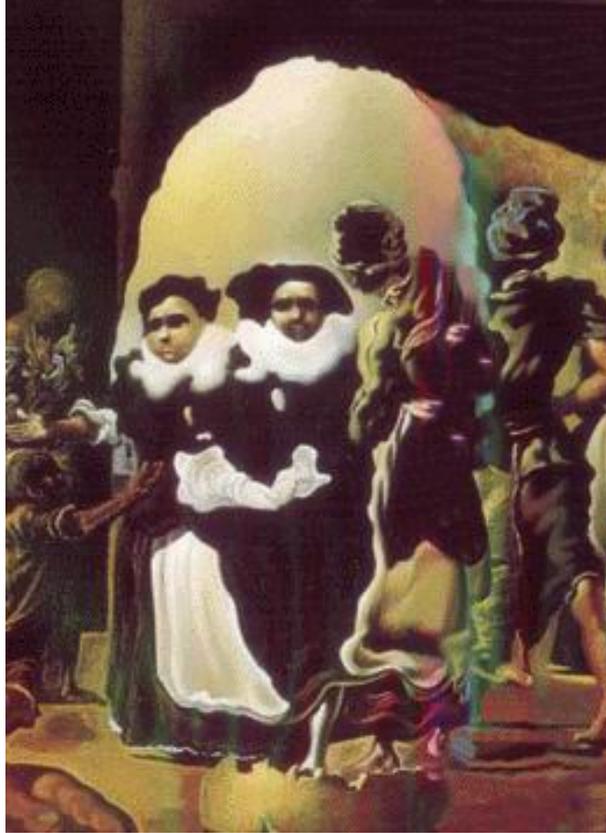


Figure 2 : marché aux esclaves

Mais je proposerais : soit N tenseurs fondamentaux g_k associés à N graphes S_k représentant N systèmes. Un système complexe S fabriqué à partir de ces N systèmes a pour tenseur fondamental $g(S)$ le tenseur issu de la réunion des N tenseurs fondamentaux complété d'un tenseur des couplages μ additionné d'un tenseur ϵ traduisant au moins une propriété d'émergence. Autrement dit :

$$\forall g_k (S_k), \text{ si } S = \bigcup_k S_k, \mu = \cap_{kk'} (S_k, S_{k'}) \forall (k, k'), \exists \epsilon / g(S) = \bigcup_k g_k + \mu + \epsilon$$

On admet ici que la catégorie S est métrisable dans un sens généralisé. Ceci reste à démontrer, mais on peut imaginer l'existence d'un invariant autour de la quantité d'information généralisée, et de là définir une distance sur l'invariant entre des quantités duales. Ce postulat m'est inspiré par les travaux de Green sur les liens entre probabilité quantique et quantité d'information au sens de Shannon¹².

Les émergences peuvent être vues comme des non linéarités particulières, très abruptes. C'est pourquoi, pour clarifier le débat, il faudra s'accorder sur une définition mathématique de l'émergence acceptée par tous pour pallier aux ambiguïtés de la terminologie. Par ailleurs, certaines émergences semblent pouvoir être modélisées de façon plus "lisse" par des techniques comme la relativité

12. "Information theory and quantum physics" de Herbert S.Green chez Springer, 1999.

d'échelle de Laurent Nottale. Mais cela ne remet pas en question fondamentalement la définition proposée.

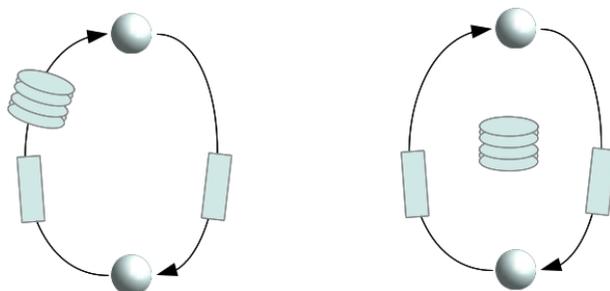


Figure 3 : deux représentations d'un circuit avec inductance

7 Emergences en électromagnétisme

Les émergences au sens de la systémique en électromagnétisme classique et en restant inspirés par notre définition précédente, ne sont pas nombreuses. Pour les détecter, on sait qu'elles font forcément référence à des phénomènes complexes, développés surtout empiriquement et théoriquement nécessitant l'addition d'un terme lors d'une transformation. De bons candidats à ces propriétés sont les supraconducteurs. Dans la théorie BCS pour les supraconducteurs "classiques", Bardeen, Cooper et Schrieffer ont introduit une fonction d'onde variationnelle dans l'hamiltonien. Quant aux supraconducteurs "à haute température", on ne sait toujours pas aujourd'hui expliquer leur fonctionnement. Les propriétés supraconductrices apparaissent sous des conditions de température et de structure cristalline données. A température ordinaire et sans interactions entre électrons cet effet n'existe pas et n'apparaît pas par la simple sommation d'électrons dans un volume.

8 Conclusion

Finalement nous avons discuté de propriétés, de caractères, de traces de la complexité. A minima, elle implique des situations physiques où les algorithmes de résolution soit n'existent pas, soit engendrent des temps de calculs aléatoires ou infinis. Lorsque l'on étend la réflexion à des systèmes complexes au sens où la systémique l'a abordé, on touche aux systèmes sociaux, vivants, etc., dont on imagine difficilement la simulation. Pourtant les travaux se multiplient en économie, en biologie, en étude des réseaux, etc., qui dégagent de premiers modèles dont les performances étonnent souvent malgré la naïveté des démarches. Par ailleurs le recul d'aujourd'hui sur les performances des machines humaines montre qu'elles restent très grossières et les gains attendus en écologie imposent des démarches d'ingénieurs totalement nouvelles qui impliquent des systèmes de plus en plus compliqués, et à la fin, complexes. Certes suivant les métiers et les expériences, certains de ces indicateurs de la complexité pourront être modulés, d'autres non admis, mais dès lors que l'on veut distinguer la complexité du compliqué, on retrouve peu ou prou les mêmes arguments. La communauté de la systémique et l'association AFSCET en débat souvent entre autre au cœur

de congrès interdisciplinaires comme le congrès Européen de Systémique (UES), et des mots-clés reviennent régulièrement quelles que soient les applications. On peut donc penser que même s'ils sont toujours discutables (et cela est cohérent avec le complexe!) ils portent probablement une bonne part d'une définition consensuelle acceptable par tous.

On propose finalement, qu'un système complexe soit :

1. enchevêtré ;
2. en partie aléatoire ;
3. non linéaire, pourvu de structures de boucles de réactions ;
4. ouvert et en interaction avec son environnement ;
5. disposant de caractères issus de phénomènes d'émergence.

Les travaux sur les catégories, la topologie, les algèbres variés, les jeux, se regroupent pour tenter de trouver des théories qui permettent de modéliser ces systèmes. Le challenge à venir que constituent les simulations des systèmes complexes passera sûrement par l'interdisciplinarité des sciences et des projections subtiles sur des graphes multiphysiques et multiéchelles dont Gabriel Kron, Norbert Wiener, etc., ont été les inspirateurs dans les années 1940 à 1970, à une époque où l'on commençait à rêver de robots quasi-humains¹³.

Remerciements

Merci à François Dubois pour son aide sur les sujets abordés dans cet article.

13. Le roman "Les robots" d'Isaac Asimov date de 1967.