

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 12, novembre 2014
Modélisation des Systèmes Complexes

Res-Systemica, volume 12, article 10

L'héritage de Norbert Wiener
et la naissance de la cybernétique

Jacques Printz

article reçu le 23 novembre 2014
exposé du 08 avril 2013



Creative Commons

Historique

Contenu

L'HERITAGE DE NORBERT WIENER ET LA NAISSANCE DE LA CYBERNETIQUE.....	2
COMMENT NAQUIT LA SYSTEMIQUE	2
<i>Les faits</i>	2
<i>L'idée</i> ...	4
<i>La mise en œuvre et les premières applications</i>	8
MODELISER POUR COMPRENDRE : LA SINGULARITE INFORMATIQUE	12
L'INGENIERIE DU 21 ^{EME} SIECLE	14
<i>Education</i>	18

Figures

FIGURE 1 : DE LA GENERATION DES PIONNIERS A CELLE DE L'ECONOMIE NUMERIQUE	11
FIGURE 2 : LES TROIS COMPLEXITES DE LA NOUVELLE INGENIERIE.....	14

NB : Ce préambule historique est une partie de l'ouvrage en préparation *Introduction à la systémique*, Daniel Krob, Professeur à l'Ecole Polytechnique, Jacques Printz, Professeur Emérite au Cnam.
Sans prétendre à l'exhaustivité historique, ce préambule donne quelques informations précises concernant les préoccupations des fondateurs de ce qui deviendra la systémique. Il fait référence à des chapitres de l'ouvrage en cours de rédaction, sans que cela nuise à sa compréhension. Pour l'avancement de la rédaction voir www.cesames.net

Avancement

☞ Deux chapitre écrits : *Premières définitions – Premiers usages*, et *Les systèmes de la société numérique*. Une étude de cas validée sur *Aspects systémiques du système électrique français*. Un chapitre sur l'architecture systémique [Daniel Krob].

Pointe également vers plusieurs chapitres à écrire *Interopérabilité et Systèmes de systèmes*, *Complexité et stabilité des systèmes*, *Systèmes et machines abstraites* et une étude de cas *Système projet – Système qualité* concernant la résilience systémique.

L'héritage de NORBERT WIENER et la naissance de la cybernétique

Comment naquit la systémique

Dans ce chapitre nous nous proposons de revisiter l'événement déclenchant à l'origine de ce qui deviendra la science des systèmes, ou systémique, dont le mathématicien Norbert Wiener, professeur au MIT, a été l'acteur emblématique¹. Le résumé que nous proposons n'a aucune prétention historique pour ce qui concerne la chronologie des faits, pour autant que l'on puisse la restituer², ce qui d'ailleurs n'aurait pas un grand intérêt. Il essaye, par contre de recréer le climat dramatique de l'époque où tous les scientifiques disponibles se retrouvent mobilisés dans l'effort de guerre anglo-américain pour combattre les totalitarismes, certains avec conviction et sans état d'âme, comme John von Neumann, d'autre par devoir moral comme Norbert Wiener, plutôt pacifiste et que la violence répugnait. C'est une période d'interactions et d'échanges intenses entre des personnalités scientifiques exceptionnelles, souvent d'origine européenne, où l'urgence est le bien commun. Pour en démêler l'écheveau, il faut par la pensée essayer de se remettre dans la situation pour juger de l'importance potentielle des contributions des uns et des autres, et pour cela, il est indispensable d'en comprendre la problématique en profondeur.

NB : Nous avons volontairement ignoré l'apport du biologiste Ludwig von Bertalanffy et sa *General System Theory* qui aujourd'hui ne représente plus qu'un intérêt historique³. Son influence dans le domaine de l'ingénierie a été faible, voire nulle, vu le niveau de généralité où il se plaçait, et de toute évidence l'ingénierie n'était pas son domaine de préoccupation, contrairement à N.Wiener, J. von Neumann, ou A.Turing qui ont mis « les mains dans la colle ».

Les faits

Le problème posé à Norbert Wiener⁴ et à son groupe du MIT⁵ était d'étudier les moyens d'augmenter le nombre de coups au but pour améliorer la défense antiaérienne dont l'efficacité pouvait être mesurée par le ratio du nombre de tirs effectués par avion abattu, ceci afin de mieux gérer la ressource « obus », de faire le maximum de dégât chez l'adversaire [les pilotes d'avions sont une ressource rare] et surtout de sauver des vies humaines.

Au moment où Norbert Wiener démarre sa réflexion, l'environnement technologique peut être résumé comme suit :

¹ Mais pas l'acteur unique ! John von Neumann a joué un rôle majeur, sinon plus important, au plan pratique et théorique. Pour un aperçu complet, voir George Dyson, *Turing's cathedral – The origins of the digital universe*, Penguin 2012 ; William Aspray, *John von Neumann and the origins of modern computing*, MIT Press, 1990, en particulier le chapitre 8, *A theory of information processing*.

² L'un des ouvrages incontournables qui décrit le mieux cette ambiance si particulière est le livre de S.J.Heims, *John von Neumann and Norbert Wiener, From mathematics to the technologies of life and death*, MIT Press, 1980 ; et plus récemment, Paul Kennedy, *Le grand tournant : pourquoi les alliés ont gagné la guerre, 1943-45*, Perrin, 2012.

³ Pour une étude exhaustive, voir la thèse de David Pouvreau, *Une histoire de la « systémologie générale » de Ludwig Bertalanffy – Généalogie, genèse, actualisation et postérité d'un projet herméneutique*, EHESS, Mars 2013.

⁴ Voir le chapitre 12, *The war years 1940-45*, de son autobiographie, *I am a mathematician*, MIT Press, 1964, Paperback edition.

⁵ Parmi lesquels Julian Bigelow ; cf. l'article, *Behavior, purpose and teleology*, co-écrit par Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener, Julian Bigelow, téléchargeable sur le site JSTOR.

❖ Les artilleurs ont une parfaite connaissance de la balistique et disposent de tables de tir pour effectuer le réglage des canons terrestres, en tir tendu et en tir courbe, et ce sur des distances pouvant aller jusqu'à 20-30 km [il faut corriger la force de Coriolis engendrée par la rotation de la terre]. Le ciblage final se faisant avec des observateurs à proximité des zones d'impacts, donnant les ordres de corrections par téléphone en 1914, puis par radio. Les tirs de DCA se font dans un environnement complètement nouveau sur des cibles mouvantes, les avions dont la vitesse peut atteindre les 600 km/h, soit environ 170 m/sec, à des altitudes de 5 à 6.000 m. Avec des obus à grande vitesse initiale, 800 à 1.000m/sec, il faut compter 5 à 6 secondes pour déclencher l'explosion susceptible de détruire la cible, et ce sans tenir compte de la décélération qui va ralentir la vitesse initiale.

NB : en 10 sec de chute libre, un objet parcourt environ 500 m et atteint une vitesse de 100 m/sec [360 km/h].

Combiné à la vitesse de l'avion et aux initiatives du pilote qui peut louvoyer, on comprend facilement que le « coup au but » est quelque chose de tout à fait improbable et pourquoi il va falloir « arroser » une très large zone, avec de nombreux canons et une grande quantité de munitions, pour espérer avoir un effet ; quant à l'efficacité ... mieux vaut oublier.

❖ Les premiers radars [RADIO DETECTION AND RANGING] ont fait leur apparition en Angleterre où ils ont joué un rôle essentiel et permis à la RAF de contenir les assauts de la Luftwaffe. Le radar permet de « voir » longtemps à l'avance les formations de bombardiers en cours de regroupement, ce qu'aucun observateur ne serait capable de détecter par des moyens simplement visuels, vu les distances, le renseignement *in situ* étant évidemment impossible. Grâce aux radars, le centre de commandement des opérations aériennes comprend ce qui va probablement se passer et peut donc prépositionner sa riposte avec le maximum d'efficacité pour les avions « chasseurs ». En d'autres termes, le radar permet de tout savoir sur la trajectoire suivie par la cible : position, vitesse et accélération éventuelle, et d'intégrer tout cela pour calculer les trajectoires probables des bombardiers.

❖ Le MIT, *Massachusetts Institute of Technology*, dispose, à cette époque, d'un des tous premiers laboratoires d'électronique concernant l'étude des servomécanismes, le *Lincoln Laboratory*, qui s'illustrera plus tard dans la réalisation du système SAGE⁶, premier système de défense antiaérienne que l'on peut qualifier de moderne. Les servomécanismes sont en train de devenir des dispositifs essentiels au réglage automatique de pièces mécaniques mobiles de façon à contrôler au plus fin leurs mouvements et amortir les chocs générateurs de vibrations destructrices. C'est fondamental pour mouvoir les châssis des canons antiaériens et suivre la trajectoire des avions à abattre. L'asservissement du mouvement nécessite des mesures précises, en particulier celle de la masse à mouvoir, afin d'actionner les effecteurs avec les bonnes données de réglage et d'effectuer les corrections de façon cyclique.

De ces automatismes naissent toutes les études concernant les fonctions de transferts qui ont comme propriétés fondamentales de réinjecter en entrée une partie des résultats qu'elles produisent en sortie. La connaissance de la fonction de transfert, obtenue soit empiriquement par expérimentation, soit théoriquement par calcul, soit par combinaison des deux, est donc une donnée fondamentale pour effectuer une bonne régulation des mécanismes en question.

A l'aide de ces mécanismes, on va savoir amplifier, dans un rapport 1 à 100/1.000, voire plus, selon le principe du levier ou du gouvernail, à partir d'un signal faiblement énergétique [courant électrique, cisaillement d'un circuit hydraulique] qui reproduit fidèlement à petite échelle un phénomène beaucoup plus énergétique comme le mouvement d'un affût de canon pouvant peser plusieurs centaines de kilos, voire quelques tonnes pour les tourelles des canons de marine pour lesquelles il faut compenser les mouvements erratiques du bateau. L'obtention

⁶ Semi Automatic Ground Environment; voir le livre de Kent C. Redmond *From Whirlwind to MITRE: The R&D Story of The SAGE Air Defense Computer* (MIT Press, History of Computing).

de signaux « fidèles » et non contaminés par les « bruits » aléatoires de l'environnement est donc absolument essentiel.

❖ On sait également « calculer » de façon rapide et inopinée, avec des calculateurs analogiques assez difficile à manipuler, quelques unes des opérations mathématiques fondamentales du calcul différentiel et intégral, le *Calculus* des anglo-saxons, comme ceux qui équiperont les viseurs des bombardiers B29, autre célébrité des machines issues de la 2^{ème} guerre mondiale. Les premiers ordinateurs verront le jour quelques années plus tard, mais il est certain que Norbert Wiener en avait déjà une intuition relativement précise compte tenu de l'environnement exceptionnel dans lequel il baignait et dont il était une des personnalités marquantes ; il connaissait bien John von Neumann avec lequel il en avait discuté à de nombreuses occasions⁷.

Plutôt que de faire de longs calculs fastidieux à la main, en consultant des tables et des abaques familières aux ingénieurs, il devenait plus simple de faire des calculs en direct avec des fonctions « programmées » sous forme analogique. Et comme par ailleurs on savait « nettoyer » le signal porteur d'information du bruit de fond ... on pouvait calculer de façon sûre les paramètres des réglages nécessaires aux différents appareils, à la demande.

L'idée ...

Le coup de génie de Norbert Wiener est d'avoir compris qu'en intégrant toutes ces technologies convenablement, et en réussissant à faire travailler ensemble ceux qui les développaient, on allait être capable de créer des machines pouvant reproduire des comportements comme le geste d'un joueur de base-ball, sport en vogue chez les étudiants des universités de la *Ivy League* de la côte Est, interceptant de façon précise les balles aux trajectoires étranges [ce sont des courbes gauches], impulsées par le « batteur ».

D'une certaine façon, on peut dire que la machine dispose, dans la mémoire de ses circuits électroniques, d'un « modèle » du comportement des objets sur laquelle elle est sensée agir, en l'occurrence le couple avion/pilote. Le terme consacré pour désigner ce type de capacité, qui n'apparaîtra qu'avec les premières applications informatiques trente ans plus tard, sera celui de « métamodèle », car les règles qui le définissent sont indépendantes du support, elles sont au-delà, ou au dessus, [le sens du mot grec *μετα*] du support matériel. La programmation étant elle-même un modèle, le modèle de cette programmation est qualifié de métamodèle pour éviter la confusion ; c'est une entité logique capable de se décrire avec ses propres règles, comme la machine universelle de Turing qui peut se décrire elle-même, ou la grammaire du français écrite en français qui dans ce cas est son propre métalangage. Quand les ordinateurs commenceront leur développement exponentiel, dans les années 70-80, on comprendra vite que ces règles fondamentales pour comprendre le QUOI des systèmes, peuvent, et même doivent, être spécifiées dans un langage indépendant des différentes cibles possibles. Il est exprimable dans le langage d'une machine universelle de Turing, indépendamment de toute technologie⁸, donc adaptable à tout support physique permettant d'en traduire la logique à même de la représenter [circuiterie analogique, tubes électroniques, et bientôt transistors]. C'est une pure abstraction, totalement immatérielle, mais sans laquelle il est impossible d'agir. Le modèle ainsi obtenu concentre l'information nécessaire à l'action du système [ce qu'il fait, en termes fonctionnels] et à l'action sur le système [comment il est fait] dans sa réalité organique ; il définit les modalités des interactions valides, et en ce sens, il fonctionne comme une grammaire des actions à effectuer.

⁷ Cf. *John von Neumann: Selected letters*, Miklos Rédei editor, History of mathematics Vol. 27, London mathematical society, American mathematical society.

⁸ En informatique théorique, c'est la thèse de Church-Turing qui dit que tout ce qui est « calculable », au sens logique du terme, est exprimable par une machine de Turing qui devient, de ce fait, un langage de modélisation universel ; c'est le cas aujourd'hui où l'informatique a diffusé dans toutes les disciplines.

NB : Notons que tout niveau d'abstraction, dans un système, est un modèle des entités ainsi abstraites. Dans un ordinateur moderne, il y en a une bonne vingtaine ! Plutôt que d'empiler les « méta », il est plus simple et plus clair de dire que la couche N dispose d'un modèle de la couche immédiatement inférieure dans la hiérarchie des entités systèmes.

Dès cet instant, nous sommes en 1942-43, on pouvait déjà formuler une des premières lois de la systémique naissante :

☞ Pour interagir avec un environnement, tout système doit disposer d'un modèle abstrait de cet environnement indépendant de la nature physique/organique de cet environnement et du système.

Dans le cas du système de tir étudié par Norbert Wiener, le modèle est celui des équations de la mécanique rationnelle, version Lagrange/Hamilton, appliquées à la balistique des trajectoires atmosphériques dont il faut connaître les paramètres : température, pression, humidité, vents, etc.

Les machines conçues sur ces principes, imitant certains comportements jusqu'alors caractéristiques des organismes vivants, se voyaient ainsi dotée d'une « intelligence » toute mécanique que plus tard, dans les années 50, on appellera « intelligence artificielle »⁹, complètement construite par l'intelligence humaine grâce à la connaissance des lois de la nature et à la capacité de rétroactions rapides et précises, pour les corrections des 2^{ème} et 3^{ème} ordre [ce sont des quantités infinitésimales], c'est-à-dire la grandeur à l'instant t , ses dérivées premières et secondes. Plus prudent, Norbert Wiener utilisait le terme “*Machine learning*”, dès 1946, moins trompeur et plus précis que le médiatique « intelligence artificielle », pour faire rêver ! Terme encore utilisé au Etats-Unis, de préférence à *artificial intelligence*.

En fait, la trajectoire de l'avion n'est pas quelconque car elle est soumise à différents types de déterminismes dont le pilote doit tenir compte dans ses décisions qui elles, peuvent être imprévisibles quoique probables. L'avion est soumis aux lois de la mécanique rationnelle, et à celles de la mécanique de ses structures qui peuvent se rompre, la résistance des matériaux étant l'un des piliers des sciences de l'ingénieur. Le pilote peut également exécuter des manœuvres dangereuses, voire mortelles, pour sa propre sécurité physiologique [voile « noir », augmentation du poids apparent et difficultés à bouger, perte de connaissance due à la force centrifuge, etc.], et il doit tenir compte des décisions des autres pilotes de son escadre. Malgré toutes ces contraintes, la trajectoire peut être extrapolée, calculée grâce aux données recueillies par les radars ; et Norbert Wiener était un maître du calcul des trajectoires apparemment aléatoires comme celles des particules soumises au mouvement brownien qu'il avait été le premier à savoir calculer, avec des intégrales de Lebesgue dont ce fut une des premières applications concrètes. Il considérait la mécanique statistique, et ses créateurs Ludwig Boltzmann et Josiah Willard Gibbs, comme une contribution absolument essentielle à la nouvelle physique entrain de naître et à une compréhension plus juste du fonctionnement de la nature.

NB : Rappelons que pour une courbe gauche, il faut au moins quatre points ; avec un seul point, on est dans « une boule », deux points déterminent une direction [la vitesse], avec trois nous avons l'accélération plane [la courbure], et avec quatre nous avons deux plans donc la torsion de la courbe, soit une position et trois vecteurs. Avec ces quatre paramètres le mobile pourra être localisé dans un cône de plus en plus fin.

A partir de ces données on peut calculer les valeurs exactes à fournir aux servomécanismes pour pointer les canons dans la bonne direction, suivre le mouvement des avions, et régler les

⁹ Terme utilisé par John Mc Carty, en 1955-57, alors à Dartmouth, de préférence à l'austère *Mathematical logic*.

fusées des obus pour qu'ils explosent au bon moment, dans la région la plus probable de la présence des avions, tout en corrigeant à la marge avec les dernières données en provenance des radars, pour autant que l'on sache calculer assez vite et transmettre les données sans erreur. En effet, entre l'instant T de la situation, et celui où les ordres transmis seront effectifs, il s'écoule un temps ΔT ; si ΔT est trop grand, eu égard à l'évolution de la situation, les ordres seront inadaptés. Cet intervalle ΔT , temps de réponse et/ou latence des phénomènes, est une information fondamentale concernant la fonction de transfert.

Norbert Wiener a très vite compris qu'il avait là, à portée de main, tous les ingrédients d'une nouvelle méthode d'analyse des problèmes permettant d'envisager des solutions à des situations restées inaccessibles à l'analyse car trop complexes, bien au-delà des machines « simples » auxquelles les ingénieurs avaient été confrontés jusqu'alors. En faisant interagir correctement du « simple », on pouvait créer du « complexe » régulé et utile, organisé, tout en respectant les lois de l'ingénierie. Sa façon à lui de remettre de l'ordre dans un monde soumis au désordre entropique.

Il baptisa cette « nouvelle science » CYBERNETIQUE, ou art du pilotage, façon barreur, en adaptant le mot grec [κυβερνητική] utilisé pour désigner le pilote des bateaux avec lesquels les anciens grecs avaient conquis la méditerranée, mer instable s'il en est, un terme que l'on retrouve dans la racine de nombreux mots comme gouvernail, gouvernes, gouvernement, etc.

L'essence même de cette nouvelle science est bien celle des actions temporelles à entreprendre dans un environnement instable, on dira plus tard non linéaire, pour aller d'un point A à un point B, exactement comme un barreur qui sait que la ligne droite n'est jamais la bonne façon de s'y prendre quand il faut tenir compte des courants, des marées, du vent, des mouvements du bateau [roulis, tangage, lacets], des vagues, etc. ... pour manoeuvrer les voiles et le gouvernail. Les actions effectuées sont finalisées¹⁰, c'est-à-dire organisées et régulées en fonction du but atteindre, but, et là est la nouveauté fondamentale, qui est une cible mouvante résultant d'un environnement lui-même structuré mais dont les lois sont dans une large part inconnues bien qu'elles existent [bien plus tard, on parlera de chaos déterministe pour les caractériser]. Le plan des actions doit donc pouvoir être adapté en permanence, ce qui est difficile avec les calculateurs analogiques, mais qui est intrinsèque à l'architecture de von Neumann où l'information enregistrée dans la mémoire de l'ordinateur [*computing instrument* dans sa terminologie] est tantôt programme, tantôt données [mais il faudra travailler encore 10 ans avant que ce rêve logique devienne réalité]. Comment se servir utilement de l'environnement pour parvenir à ses fins, telle est l'ambition de la cybernétique. Pour cela, il va falloir être « intelligent » ... façon Norbert Wiener, c'est-à-dire en mathématicien¹¹.

En réfléchissant bien, on voit que l'on a affaire à une double trajectoire, une double dynamique, d'une part celle imposée par l'environnement [c'est-à-dire ce qui est considéré comme ne faisant pas partie du système], ce que des biologistes comme C.Waddington appelleront « paysage épigénétique » [que R.Thom rebaptisera espace substrat, ou encore déploiement phénoménologique], et d'autre part celle du mobile que le pilote peut diriger compte tenu des capacités propres à ce mobile et de l'expérience qu'il a des comportements observés de l'environnement et de la dynamique évolutive qui le caractérise. Le pilotage consiste donc à asservir la trajectoire pour aller de A à B en utilisant au mieux la dynamique environnementale pour optimiser le parcours. Quand le pilote a suffisamment navigué et acquis de l'expérience, soit empiriquement, soit théoriquement par la connaissance des lois phénoménologiques qui structurent les transformations de l'environnement dont d'ailleurs il

¹⁰ Avant les très officielles *Conférences Macy*, de 1942 à 1953, il y avait eu une éphémère *Teleological Society* qui se réunissait informellement.

¹¹ Voir son autobiographie, *I am a mathematician*, MIT Press, 1956, qui ne laisse aucun doute sur sa façon de voir le monde.

fait partie, il sait comment enchaîner les actions qui vont lui permettre d'atteindre son but, ordonnancement dont il est le seul juge car il connaît la situation locale.

Le pilote doit donc extraire de l'information de son environnement, et pour cela disposer de capteurs ad hoc, et traduire cette information dans le « langage » comportemental des effecteurs du mobile dont le concepteur est maître, une opération que les physiciens et électroniciens connaissent bien, pour laquelle le terme consacré est « transduction », par exemple transformer un courant électrique en pression hydraulique asservie sur le signal véhiculé par le courant [voir Annexe 1 du chapitre *Premières définitions*].

Dans l'approche de Norbert Wiener, qui dit interactions, dit implicitement éléments qui interagissent dans un certain ordre via des échanges d'énergie. Ces éléments sont les constituants du système, [les “*buildings blocks*” dans le jargon informatique d'aujourd'hui ; un bien meilleur terme que celui de « boîte noire » couramment utilisé à l'époque], à l'exclusion des autres qui sont donc simplement ignorés, mais qui sont tout de même là.

Pour N éléments, il y a $N \times (N-1)$ liens d'échanges monodirectionnels, mais si le système s'organise, si certains éléments ont de la « mémoire », éventuellement par opérateurs humains interposés, il va falloir considérer l'ensemble des parties de ces éléments, soit en théorie 2^N combinaisons, et des séquences d'actions temporelles possibles en encore beaucoup plus grand nombre, séquences qui seront investiguées grâce à la théorie des automates dont John von Neumann jettera les bases un peu plus tard¹². Ce qui deviendra LA ou les théories de la complexité sont donc en germe dès le départ de la science des systèmes, mais c'est John von Neumann qui en sera le véritable initiateur¹³. Curieusement, N.Wiener n'en parle jamais, ni d'ailleurs de la théorie des automates, ce qui ne veut pas dire qu'il ne la connaissait pas ! Organiser cette complexité, c'est-à-dire spécifier l'architecture du système à l'aide de modèles logicomathématiques rigoureux et précis, deviendra vite le centre organisateur des projets, comme le système SAGE, avec Jay Forrester qui en fera la première démonstration vivante dans les années 50. C'est lui qui le premier prendra pleinement conscience des problèmes pratiques d'interdisciplinarité et essaiera de les résoudre grâce à des modèles permettant les échanges entre parties prenantes, y compris les militaires dans le cas de SAGE¹⁴.

Concernant l'objet même de la cybernétique, la position de N.Wiener est on ne peut plus claire. Il nous dit¹⁵ : “... from the point of view of cybernetics, the world is an organism, neither so tightly joined that it cannot be changed in some aspects without losing all of its identity in all aspects nor so loosely joined that any one thing can happen as readily as any other thing. It is a world which lacks both the rigidity of the Newtonian model of physics and the detail-less flexibility of a state of maximum entropy or heat death, in which nothing really new can happen. It is a world of Process, neither one of a final equilibrium to which Process leads nor one determined in advance of all happenings, by a pre-established harmony such as that of Leibniz. ... Life is the continual interplay between the individual and his environment rather than a way of existing under the form of eternity”. C'est bien de la science des systèmes dont il s'agit, sans contestation possible.

¹² Sur ce point tout à fait fondamental, on peut relire le mémo rédigé par Claude Shannon *Von Neumann's contributions to automata theory* [disponible sans problème sur le Web] ; voir également le livre récent de George Dyson, *Turing's cathedral – The origins of the digital universe*, déjà cité.

¹³ Voir les retranscriptions de ses conférences du Hixon symposium, septembre 1948, dans *Theory of self-reproducing automata*, 1966, University of Illinois Press, éditées à titre posthume par Arthur W. Burks ; et le volume V des œuvres complètes : *Design of Computers, Theory of Automata and Numerical Analysis*, Pergamon Press, 1961. C'est sans appel pour quiconque veut bien se donner la peine de les lire. Stanislas Ulam développera certaines idées de son collègue et ami sur les automates autoreproducteurs.

¹⁴ Sur tous ces aspects, voir K.Redmond, T.Smith, *From Whirlwind to MITRE, The R&D story of the SAGE Air Defense computer*, MIT Press, 2000, déjà cité.

¹⁵ Autobiographie, page 327.

La mise en œuvre et les premières applications

La cybernétique a connu un étrange destin de part et d'autre de l'Atlantique.

Aux Etats-Unis, elle est restée grosso modo une science de l'ingénieur où elle a prospéré sous les auspices du MIT, avec en particulier Jay Forrester, directeur du projet SAGE et futur professeur à la Sloan School. Il publiera, entre autres, deux livres qui feront date dans la science des systèmes : *Industrial dynamics*, en 1961 et *Principles of systems*, en 1971, récemment réédités chez Pegasus Communications. La cybernétique de N.Wiener, version J.Forrester, s'est intégrée avec succès dans les cycles d'ingénierie des systèmes complexes, sans même parfois dire son nom, une vraie mise en œuvre du « Wou Wei », l'art de gouverner sans agir, sans effort et spontanément, des empereurs de Chine¹⁶, en particulier dans l'ingénierie de la qualité¹⁷ qui est fondamentalement une régulation tout au long du cycle de vie par rapport au contrat de service exigé par les usagers du système. La qualité est une « trajectoire », un chemin, qui se construit en prenant en compte les aléas de l'environnement du projet, y compris ceux des organisations. Pour cela, elle doit être dans les têtes de tous les acteurs et parties prenantes, et non dans une direction que l'on exhibe comme une danseuse pour montrer qu'on en fait. La vocation de la qualité est d'être, et non de paraître, prégnance et non saillance. La nature entropique de l'activité humaine fait que si elle n'est pas entretenue dans la durée, elle dégénère et le désordre reprend ses droits.

Plus récemment, la systémique a même connu un franc succès médiatique aux Etats-Unis avec un livre culte *The fifth discipline*, présentant la "System thinking" pour un vaste public, dans le langage simple qu'affectionnent les anglo-saxons¹⁸.

En France, les choses ont été différentes car très vite la cybernétique chercha des domaines d'applications bien au-delà de ce qu'elle était capable d'expliquer, à défaut de prédire, en sociologie des organisations ou en biologie. Norbert Wiener a probablement lui-même contribué indirectement à cet état de fait sous l'influence de son livre grand public *Human use of human beings*, très vite accessible en français sous le simple titre *Cybernétique et société*¹⁹, ouvrage plus accessible que son *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, paru simultanément en 1948 au MIT Press et chez Hermann, en France. Grâce à la cybernétique, Norbert Wiener pensait expliquer la complexité des sociétés humaines, l'histoire, ... ce qui dans des cerveaux positivistes façon Auguste Comte réveillaient de vieux souvenirs d'« ingénierie » et de « physique » sociale dont Emile Durkheim s'était fait le champion dans ses travaux fondateurs. Dans l'atmosphère des années 50, en pleine guerre froide qui risquait de devenir chaude à tout moment, certains rêvaient de « machines à gouverner le monde » pilotées par des « scientifiques » jugés plus fiables que les politiques et les idéologies qui avaient plongé le monde dans le chaos. Rêve utopique, bien sûr, car comme Von Neumann l'avait rappelé, peu de temps avant sa mort en interrogeant : « Qui gardent les gardiens ? », et c'est là tout le problème, centralisé et/ou distribué, il faut choisir, et interagir, en évitant à la fois les goulags et les camps de rééducation de l'« Homme nouveau », et les désordres individualistes du « chacun pour soi ».

Toujours est-il que la cybernétique n'entra jamais véritablement dans le territoire des sciences de l'ingénieur, sauf à la marge, grâce à des initiatives individuelles²⁰, avec une petite

¹⁶ Dans la Cité Interdite, à Pékin, dans la salle de l'union du Palais de la Tranquillité, tous les visiteurs peuvent voir inscrits au dessus du trône de l'Empereur les deux caractères « wou wei », en chinois traditionnel : 無 爲

¹⁷ Voir les livres de Gerald Weinberg, en particulier *Quality software management, System thinking*, Dorset House Publishing, 1991.

¹⁸ *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization* (1^{ère} édition 1990, dernière édition 2006) ; a book by Peter Senge , MIT lecturer.

¹⁹ Plusieurs éditions, dont la plus complète à UGE/10-18 en 1971.

²⁰ Comme celle de Gérard Donnadiu à l'IAE ; cf. son livre, avec Michel Karski, *La systémique, Penser et agir dans la complexité*, 2002.

exception dans les cursus du Cnam, où il faut signaler l'action des professeurs Jacques Lesourne²¹ et Jean-Pierre Meinadier²² ; en tout cas pas dans les programmes des Grandes Ecoles, où elle avait plutôt une réputation sulfureuse et d'absence de sérieux. Il est vrai que lorsque l'on examine froidement, sans esprit polémique, le jargon introduit par Edgar Morin, on a un sentiment de nausée tant l'inflation verbale et la combinatoire de mots creux s'y donne libre cours²³. « Fumeux » auraient dit nos professeurs ! Créer des néologismes chaque fois que l'on croit avoir découvert quelque chose d'original n'a jamais expliqué quoi que ce soit, ni résolu le moindre problème. On sait cela depuis Guillaume d'Ockham et son principe de sobriété, pour le moins !

Sans faire injure à l'histoire, et reconstruire une situation plausible, peut-être était-ce dans l'esprit de Norbert Wiener une façon de donner la réplique à John von Neumann qui venait de faire paraître son très célèbre *Theory of games and economic behavior* qui allait révolutionner la science économique, sauf que lui n'avait pas le langage mathématique qui lui aurait permis d'exprimer ses idées qui fusaient dans toutes les directions. Pour qui a lu en détail ses dernières œuvres, en particulier *God & Golem, Inc.* publié en 1964, année de son décès, c'est très clair. Il nous dit, [page 88] : “Cybernetics is nothing if it is not mathematical”, et un peu plus loin : “I have found mathematical sociology and mathematical economics or econometrics suffering under a misapprehension of what is the proper use of mathematics in the social sciences and of what is to be expected from mathematical techniques, and I have deliberately refrained from giving advice that, as I was convinced, would be bound to lead to a flood of superficial and ill-considered work” ; [c'est moi qui souligne]. Il était d'ailleurs assez critique sur la théorie des jeux de J. von Neumann car il considérait qu'il était impossible d'assimiler l'économie à un jeu immuable, dans un monde où tout change, y compris les règles du jeu, ce qui est une évidence ; malheureusement, von Neumann décédé en 1957 n'était plus là pour donner la réplique. Nul doute que N. Wiener aurait été sévère face au jargon et au fatras conceptuel qui allait inonder SA théorie, et rendre la cybernétique inopérante, du moins pour les ingénieurs, lui qui avait été professeur dans l'une des plus prestigieuses écoles du monde, son cher MIT. Quant aux « mathématiques financières », un oxymore, et à la « crise systémique », il se serait sans doute étranglé de rage ...

Or ce langage nécessaire à une bonne description des processus à l'œuvre dans les systèmes, en germe dans les années 50-60, nous le connaissons bien aujourd'hui : c'est le langage de l'informatique.

René Thom qui s'était opposé avec une grande violence, à sa façon pas vraiment diplomatique, à la « dictature des concepts flous », avait tenté d'y répondre avec sa théorie des catastrophes, une appellation introduite par son collègue anglais Christopher Zeeman dont il ne revendiquait pas la paternité, mais là encore ce ne fut pas un franc succès, pour une raison d'ailleurs strictement inverse, tant le niveau mathématique exigé pour comprendre son langage géométrique, celui des variétés différentiables et des singularités, était élevé. L'un de ses meilleurs commentateurs, le grand mathématicien russe Vladimir Arnold²⁴, disait qu'entre deux lignes de Thom, il fallait en rajouter 99 autres pour obtenir quelque chose de compréhensible ! Son livre *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 1972, 357 pages, aurait donc pu rivaliser avec les milliers de pages du séminaire de géométrie algébrique de son collègue à l'IHES, A. Grothendieck ... pas vraiment évident pour communiquer !

Ce fut donc une nouvelle occasion perdue, et pourtant il y avait nécessité tant la complexité

²¹ Son livre, *Les systèmes du destin*, Dalloz, 1976, a servi de base à ses enseignements en prospective.

²² Ses deux livres, *Ingénierie et intégration des systèmes*, 1998, et *Le métier d'intégration de systèmes*, 2002, tous deux chez Hermès sont des références incontournables.

²³ Cette remarque ne concerne que la partie de son œuvre autour de *La méthode* et textes apparentés ; ses analyses sociologiques sont généralement intéressantes.

²⁴ Cf. son livre *Catastrophe theory*, 3^{ème} édition, Springer 1992.

des systèmes élaborés par les ingénieurs s'était accrue, avec de l'informatique répliquée à l'infini ou presque, à tous les niveaux, comme cela était devenu une évidence dans les programmes spatiaux, *Apollo* et surtout la *Space Shuttle*. Complexité des systèmes dont les risques commencent à être bien perçus à défaut d'être réellement compris, comme les transactions « haute fréquence », mais peut on encore parler d'ingénierie dans le contexte de l'informatique de la finance ?! Risques qui suscitent aussi, et on peut le comprendre, des craintes irrationnelles. Le devoir d'explication est donc plus nécessaire que jamais il n'a été dans l'histoire des sciences et des techniques. Pour celui qui ne comprend pas, la connaissance devient vite de la magie, ce qui ouvre la porte à l'irrationnel, fut-il affublé de mathématiques sans rigueur, comme dans la finance.

Disposer d'une méthode générale pour penser la complexité du système du monde du 21^{ème} siècle et en extraire ce qui peut en être raisonnablement automatisé, sans perdre les pédales et rester maître du jeu, tel est le problème qu'il nous faut résoudre.

Pour cela, nous devons considérer trois domaines de complexité, en relation symbiotique, au sein même des systèmes en interactions :

- La complexité des objets/systèmes techniques²⁵ que nous sommes capables de construire et de maintenir, c'est la complexité traditionnelle à laquelle les ingénieurs se sont toujours confrontés, depuis l'époque des cathédrales.

A cette complexité basique sont venues se rajouter :

- La complexité des projets d'ingénierie correspondants qui obligent à faire travailler de concert toutes les parties prenantes du système, c'est-à-dire, dans le cas d'un grand projet plusieurs milliers d'acteurs dont il faut s'assurer qu'ils sont durablement en phase [en mécanique quantique, on dirait qu'ils sont « corrélés »].
- La complexité des usages induits par les objets techniques disponibles et les nouveaux besoins que ces objets suscitent, objets aujourd'hui accessibles à tous ; avec Internet et le Web, on est dans les millions d'utilisateurs, voire des milliards !

Organiser et intégrer ces trois complexités [voir figure 2] en un tout cohérent, trouver le compromis juste, ou tout au moins acceptable, sans prendre de risques inconsidérés, tel est le challenge. L'une des caractéristiques les plus prégnantes de la complexité²⁶ est l'émergence de propriétés et/ou comportements nouveaux, impossibles à anticiper, en particulier tout ce qui a trait aux incertitudes de toute nature présentes partout, ce que dans la théorie de l'information on appelle le « bruit ». Apprendre à compenser ces aléas, à vivre en bonne intelligence avec le « bruit », voire s'en servir comme dans les codes correcteurs d'erreurs, est la clé de l'ingénierie des systèmes complexes.

On peut synthétiser la séquence qui s'amorce dans les années 40 par la figure 1. Elle est le résultat du travail de deux générations d'ingénieurs et de chercheurs. La troisième, qui commence à arriver aux manettes, a devant elle des perspectives immenses, si elle sait relever le défi et se montrer à la hauteur des enjeux.

Dans cette séquence, la France n'a pas démerité, avec des systèmes comme le STRIDA ou le SENIT du ministère de la défense. Elle a un réseau de transmission de données parmi les meilleurs du monde, grâce à son opérateur historique, France Télécom et son centre de recherche historique, le CNET aujourd'hui FT R&D ou ce qu'il en reste. Grâce au réseau de transport de l'énergie de EDF, aujourd'hui EDF/RTE, tous les foyers français et les entreprises disposent d'un courant de haute qualité bon marché, un système qui a donné de nombreuses preuves de sa robustesse dont nous reparlerons plus loin. Nous pourrions évoquer

²⁵ Sur cette double notion, voir G.Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier, et B.Gilles, *Histoire des techniques*, Encyclopédie Pléiade.

²⁶ Voir le livre du physicien Per Bak, *How nature works – The science of self-organized criticality*, Springer 1996.

l'aéronautique, l'industrie spatiale, l'automobile, les systèmes d'information avec la méthode MERISE qui introduisit « en grand » le concept logique de métamodèle en informatique, etc.



Figure 1 : De la génération des pionniers à celle de l'économie numérique

Tout cela démontre, au-delà de tous les discours plus ou moins catastrophistes, une grande capacité à gérer des environnements hautement complexes qui sont un des héritages de la génération des « Trente glorieuses » qu'il nous faut faire fructifier, et améliorer.

Le schéma de la figure 1 est simplificateur, mais il montre une dynamique et un cap qu'il ne faut pas rater. Il y a eu dans les années 70-80 une profusion de projets qui n'ont pas tous donné les résultats escomptés, mais qui de façon évidente démontre une capacité qui ne demande qu'à rebondir. Pour cela les étudiants des Grandes Ecoles scientifiques et des Grandes Ecoles de commerce /management /gestion doivent réinvestir le périmètre des systèmes et de l'industrie, abandonné dans les années 90-2000, comme les différents rapports concernant la compétitivité l'ont largement démontré.

Il est certain que la culture système, cette 5^{ème} discipline pour reprendre le titre du best seller américain de Peter Senge, un enseignant du MIT connaissant bien les travaux de Jay Forrester, va jouer un rôle crucial.

☞ Il n'est pas interdit de penser que la culture généraliste des ingénieurs français, à la fois scientifique et managériale, avec sa dimension humaniste, a beaucoup à dire sur le sujet compte tenu de nos réalisations et de nos savoir-faire, comme par exemple le programme électronucléaire mis en œuvre par EDF.

Modéliser pour comprendre : la singularité informatique

Dans la décennie 90, il est devenu manifeste que ce qu'avaient peut-être imaginé les pionniers que furent Norbert Wiener, John von Neumann et Alan Turing commençait à devenir réalité. Des trois, seul Norbert Wiener a peut-être connu les transistors [il n'en parle jamais]. Aucun d'eux n'aurait pu prévoir qu'un jour, grâce à la magie de la microélectronique et de l'intégration des composants, on pourrait disposer de machines [von Neumann parlait de *computing instrument*] un million de fois plus performantes que celles qu'ils avaient contribuées à créer, et de moyens de communications permettant : a) de transmettre des images en temps réels d'un bout à l'autre de la planète, et b) de faire travailler les machines en réseaux sur des problèmes de taille bien au-delà de ce qu'aucun humain n'était capable de maîtriser. Cette capacité allait permettre une programmation « massive », *“in the large”* comme disent nos collègues américains, quasi inexistante dans les années 50, mais qui quelques 40 ans plus tard se chiffrera en milliards de lignes de code, programmées par les millions de programmeurs que compte aujourd'hui la profession. Chaque seconde des centaines de milliards d'instructions programmées exécutent fidèlement, sans erreur ni fatigue, ce que les programmeurs ont enregistré dans la mémoire des machines dont la taille se compte en milliards de caractères. Mais comme on le verra dans cet ouvrage, cet immense succès génère concomitamment, comme en écho, son lot de problèmes nouveaux.

Un instrument comme le LHC du CERN produit à chaque expérience des milliards d'informations que seuls des ordinateurs correctement programmés permettent d'analyser et de « comprendre ». Ce que le grand public connaît comme la *“Big data”* n'est accessible que grâce aux programmes d'aide au traitement mathématique de l'information, seuls à même d'identifier dans la « masse » apparemment informe ce qui est porteur d'une information intéressante.

Aujourd'hui, en ce début du 21^{ème} siècle, plusieurs milliards de personnes, via leurs Smart phones et/ou leurs Tablettes, disposent d'une capacité d'interaction et d'accès à l'information via Internet et le Web, à une échelle encore jamais vue dans l'histoire connue de l'humanité. Elles peuvent former des communautés d'intérêt via les réseaux sociaux, capables de se mobiliser quasi instantanément pour une cause et de rétroagir en temps réel ou presque. Pas besoin d'être prophète pour comprendre que tous nos modes de gouvernance, que l'« autorité » et l'éducation, que ce qui constitue notre bien commun, que nos façons de consommer, ... vont être profondément bouleversés, pour le meilleur ou pour le pire. Nos véhicules terrestres ou aériens intègrent des microprocesseurs par dizaines et embarquent des millions de lignes de code, directement ou indirectement, pour assurer notre sécurité et optimiser les ressources. De descriptive et qualitative, la modélisation est devenue quantitative et massivement calculatoire, une aide précieuse à l'exploration non triviale de situations complexes. Un usage universel qui renforce la véracité de la thèse de Church-Turing.

☞ Nous sommes face à ce que les mathématiciens appellent une singularité, une bifurcation, à ce que les physiciens appellent un changement de phase, une restructuration de la matière, ou encore une métamorphose mais dont on ne sait pas si de la chrysalide sortira une abeille ou un frelon.

Nous sommes sur une ligne de partage des eaux où, après l'avoir franchie, plus rien ne sera comme avant, où un nouveau paysage va apparaître et se construire, où la transformation va très vite devenir irréversible, compte tenu des énergies colossales en jeu, portée par les 9 milliards d'habitants que comptera bientôt la planète.

Aujourd'hui, nous avons toute la technologie pour faire de la bonne systémique. Nous avons surtout les bons concepts et les bons langages, comme ceux des machines abstraites que nous savons définir avec toute la rigueur requise par le problème à résoudre. Nous pouvons interagir et rétroagir de façon sûre à une échelle que Norbert Wiener n'aurait jamais imaginé, avec un MIT qui a bien développé son leadership²⁷. Individus et communautés d'intérêts deviennent pour la première fois dans l'histoire sociale des « unités actives²⁸ », pour reprendre une expression heureuse de l'économiste François Perroux[†]. L'intelligence, c'est-à-dire notre capacité d'adaptation, peut se distribuer et se réguler par l'échange d'information, et ce faisant désamorcer les conflits grâce à des modèles comme ceux de la théorie des jeux dont John von Neumann a ouvert la voie, en particulier ceux qui modélisent la coopération. Sans coopération, sans rétroaction, il n'y a pas de solution aux conflits qui vont inéluctablement apparaître. Les modèles de la théorie des jeux ont peut-être évité que la Guerre Froide se transforme en catastrophe planétaire, mais nous n'en aurons jamais la certitude ; cependant, ce dont on est sûr, c'est qu'ils ont mis un peu de rationalité, là où les idéologies/idéologues avaient fait douter des capacités de l'humanité à dépasser ses rivalités fratricides. Des modèles comme celui du « Dilemme du prisonnier » auraient peut-être levés les doutes de N. Wiener à l'encontre de la théorie des jeux²⁹.

Programmer, c'est-à-dire, en fin de compte, modéliser et calculer est devenu une nouvelle façon de raisonner, ce que nous avons mis quand même quelques décennies à bien comprendre après que Alan Turing et quelques autres en aient jeté les bases³⁰. Nous pouvons imaginer des machines faisant jeu égal avec des humains, mais ce qui donne la capacité logique à la machine est sa programmation qui elle, reste totalement sous contrôle de l'intelligence humaine. Ce n'est pas *Deep Blue* qui a vaincu Kasparov, ce sont les programmeurs qui l'ont programmée. Voilà ce qu'il ne faut jamais oublier. L'apprentissage de la programmation, au sens large, pour cette raison, doit être au cœur de la formation des futurs citoyens de la société dite « numérique », comme l'ont été la lecture et les tables de multiplications, après l'invention de l'imprimerie. Là est notre futur et la condition de notre liberté. L'acte de programmation, son aspect « performatif » comme disent les linguistes, est au cœur de l'approche système.

Nous avons donc la technologie pour faire de la bonne systémique, mais nous allons aussi surtout devoir en faire par nécessité pour organiser la complexité du monde du 21^{ème} siècle, pour mettre de l'ordre et un minimum de rationalité dans ce qui pourrait aussi devenir un gigantesque chaos informationnel. Il faut être aveugle et sourd pour imaginer que les désordres socioéconomiques actuels puissent continuer encore longtemps, “*business as usual*”, et après nous le déluge. La science des systèmes nous enseigne que, tôt ou tard, tout

²⁷ Voir le site www.cesames.net des auteurs pour plus d'information.

²⁸ François Perroux, *Unités actives et mathématiques nouvelles*, Dunod, 1975.

²⁹ Voir R. Axelrod, *The evolution of cooperation*, 1984, disponible en français chez Odile Jacob, *Donnant Donnant*, 1992 ; et M. Nowak, *Super cooperators – Why cooperation, not competition, is the key to life*, 2011, Canongate Books Ltd.

³⁰ Voir Gilles Dowek, *Métamorphoses du calcul*, Le Pommier, 2007.

déséquilibre qui viole les invariants du système, entraîne une correction en rapport avec l'amplitude du déséquilibre ; le choc en retour, façon « tsunami », peut être violent s'il n'est ni anticipé, ni régulé. Les signes annonciateurs sont toujours des signaux faibles du 2^{ème} ordre³¹, indétectables par sondages statistiques. Sans le modèle théorique de Brout, Englér, Higgs et *alii*, les physiciens expérimentateurs du CERN n'auraient jamais pu découvrir le boson de Higgs. Voilà ce dont il faut se convaincre. Ce n'est pas le tout d'avoir une lampe ou une carte, encore faut-il savoir où aller chercher. Voilà ce pourquoi nous avons le devoir moral d'obtenir l'assentiment du plus grand nombre. Ce dont nous avons besoin, c'est d'une grammaire pour comprendre le monde dont nous sommes désormais une des parties prenantes, à la fois sujet et objet, spectateur et acteur, une grammaire dont la langue, c'est-à-dire nos programmes, est le langage informatique qu'il est désormais indispensable de maîtriser. Et la systémique peut grandement nous aider à voir un peu plus clair. En l'état actuel de la technologie et des méthodes d'ingénierie, il n'y a pas d'alternative

L'ingénierie du 21^{ème} siècle

Dans les problèmes d'ingénierie que posent les sociétés modernes, mondialisées et désormais massivement informatisées, il faut distinguer le nécessaire du contingent. Livrer de la technologie qui finalement sera rejetée par les usagers quelle qu'en soit la raison, ou qui s'avérera non maintenable dans la durée, voire dangereuse, doit être considéré comme une erreur impardonnable potentiellement fatale. Les phénomènes engendrés par le vieillissement des éléments, par définition inconnus, doivent pouvoir être constatés, à défaut d'être compris. Il est donc nécessaire de s'en préoccuper dès le départ du cycle de vie système, au moment de l'expression des besoins, et dans les phases d'architecture, en y associant toutes les parties prenantes. Pour cela, le système doit être instrumenté pour pouvoir être observé. La complexité que doit organiser cette nouvelle ingénierie qui émerge progressivement des réalisations, dans les années 1980-90, est triple ; figure 2.

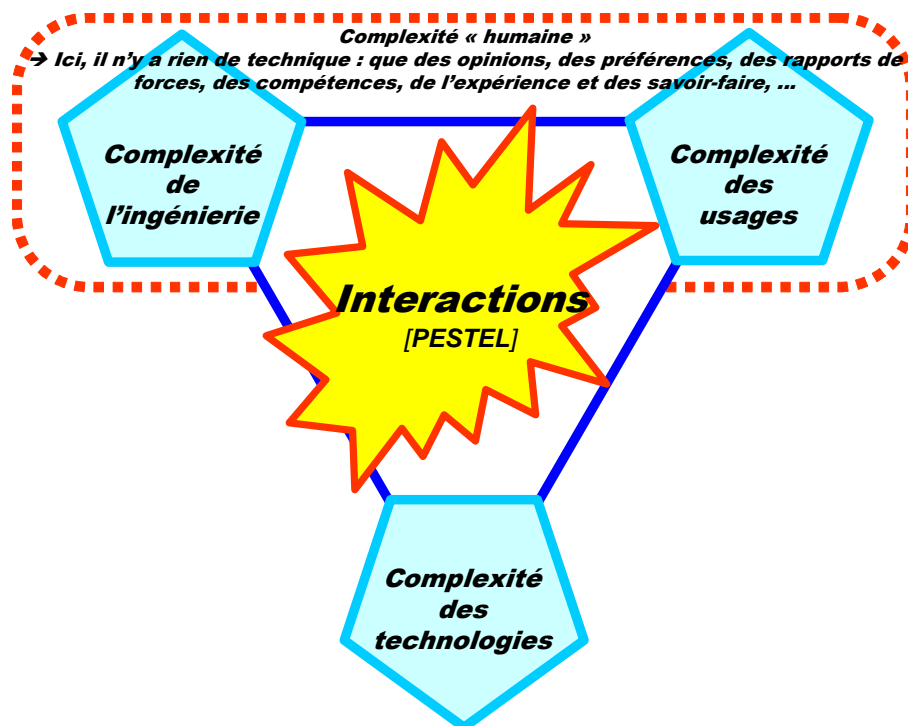


Figure 2 : Les trois complexités de la nouvelle ingénierie

³¹ Voir le cas du système électrique, ci-dessous.

A côté de la complexité des technologies qui n'a pas cessé de se développer, il suffit pour cela de regarder un microprocesseur de dernière génération, avec ses milliards de composants, ou une chaîne d'assemblage robotisée avec ses centaines de machines dans l'industrie automobile, sont venues se greffer deux complexités qualifiées de « humaines » dans le schéma : celle qui concerne l'ingénierie et ses processus projets, et celle qui concerne les usages fait par les usagers qui ne sont plus des ingénieurs comme dans les premiers systèmes, d'où incertitudes et erreurs humaines. Pour la complexité des technologies nous avons à notre disposition toute une gamme d'outils de modélisation et de simulation, qui ont connu un développement quasi exponentiel grâce à nos connaissances scientifiques, dont certaines anciennes, mais grâce surtout au formidable développement des technologies de l'information et de la communication. C'est sans précédent dans l'histoire des techniques. La durée de conception d'un avion moderne comme l'A380, ou le *Streamliner* de Boeing, a ainsi pu être divisé par deux grâce aux bureaux d'études « virtuels » mis en œuvre par les avionneurs, soit de 10 ans à moins de 5 ans !

La complexité humaine est d'un tout autre ordre. La rationalité humaine est « limitée » pour paraphraser le titre d'un ouvrage de Herbert Simon³², et il ne faut pas exclure les comportements déviants comme cela a été souligné dans les études qui ont été menées suite à la catastrophe de la navette spatiale *Challenger*³³, sans parler des errements de la finance qui ont fait fonctionner le système financier pour le 1% des plus riches³⁴. L'erreur est humaine, comme on a coutume de dire, mais elle est également omniprésente dans la nature. Ce qu'il nous faut trouver, ce sont des règles d'ingénierie et des architectures qui la compensent, comme J. von Neumann l'avait anticipé dans ses études sur les automates fiables. Nous y reviendrons dans le chapitre *Système projet – Système qualité* qui sont fondamentalement des systèmes humains, quand bien même ils sont désormais relativement informatisés. L'ingénierie de l'interface entre les usagers et les systèmes, aujourd'hui à base d'écrans graphiques, est devenu un thème majeur de la systémique.

Ces trois sources de complexité interagissent entre-elles, créant ainsi de nouvelles combinaisons dont il faut tenir compte, en les prenant deux à deux, puis trois à trois, soit au total sept possibilités. Les interactions correspondantes peuvent être organisées à l'aide des facteurs PESTEL [Politique, Economique, Social, Technologique, Ecologique, Légal]. Ignorer ces facteurs, laisser la complexité métastaser, équivaut à un arrêt de mort pour le système dont le cycle de développement n'ira pas à son terme normal.

C'est pourquoi la méthode proposée, pour une INGENIERIE DES SYSTEMES COMPLEXES OUVERTS, [ISCO], doit nous permettre de :

- Découvrir ce qui doit être nécessairement compris, et d'identifier impérativement le noyau dur du système, sa complexité irréductible, qui en sera le centre organisateur et la colonne vertébrale ; cette information vitale est le modèle du système, sa « carte » pour reprendre la célèbre expression, souvent mal comprise, de A.Korzybski : “*The map is not the territory*”³⁵. C'est une métaphore qui nous dit qu'il ne faut jamais réduire la réalité à un modèle, aussi sophistiqué soit-il.
- Exprimer et communiquer ce qui a été compris à toutes les parties prenantes afin d'obtenir l'assentiment de chacun des acteurs dans le langage qui leur est

³² Cf. *Models of bounded rationality*, 3 Vol., MIT Press ; voir aussi, Daniel Kahneman, Amos Tversky, *Choices, values and frames*, Cambridge UP ; ou encore Graham Allison, le très célèbre *Essence of decision*, 1ed Little Brown, 2ed Longman, 1999.

³³ Voir Diane Vaughan, *The Challenger launch decision*, Chicago UP ; ou la série d'ouvrage de Christian Morel, *Les décisions absurdes*.

³⁴ Thèse défendue par le prix Nobel Joseph Stiglitz dans son ouvrage, *Le prix de l'inégalité*, 2012

³⁵ Dans le chapitre IV, *On structure*, de *Science and sanity*, 5^{ème} édition, 1994.

compréhensible, selon leur point de vue, donc une pluralité de modèles dont il faut gérer la cohérence. Aucune question ne doit rester sans réponse, en évitant l'argument d'autorité, pour créer la confiance nécessaire au vivre ensemble. C'est le B.A.-BA de la bonne organisation des interactions, en quelque sorte une « géométrie du cognitif »³⁶ qui prend en compte le monde tel qu'il est.

Cette double exigence, construction et explication, doit permettre de nous attaquer avec une bonne chance de succès à la complexité des situations auxquelles nous sommes d'ores et déjà confrontés, comme le réchauffement climatique ou la bonne gestion des ressources non renouvelables. Les sombres prédictions du rapport Meadows, *The limits to growth*, violemment contesté lors de sa publication par le Club de Rome, en 1972, sont aujourd'hui une quasi réalité³⁷, surtout pour ce qui concerne la pollution des écosystèmes. Ses principaux résultats pourraient être retravaillés avec des capacités de simulation sans commune mesure avec celles des années 70s mise en œuvre par Jay Forrester au MIT. Le développement non régulé engendre des nuisances comme la pollution, un gaspillage inconsidéré des énergies fossiles crée des déséquilibres qui peuvent affecter globalement l'écosystème terrestre. Il n'y a là rien de vraiment original à inventer, mais encore faut-il prendre le problème et les questions dans le bon ordre. Quiconque a été confronté à la problématique de l'ingénierie des systèmes complexes sait que l'ordre dans lequel il faut rentrer dans le problème est à la fois dimensionnant et impératif. A cette échelle, tout problème mal posé, avec des données incertaines, devient rapidement un cauchemar combinatoire inextricable. La maturité ne se décrète pas, elle se construit pas à pas, par un long processus d'apprentissage. La psychologie cognitive, les étapes par lesquelles notre intelligence se développe, la nécessité de la coopération entre les humains³⁸, l'a d'ailleurs très bien expliquée. Il faut s'en convaincre, sans pour autant abdiquer son esprit critique et sa vigilance qu'il faut utiliser au bon moment pour valider ou réfuter les hypothèses du modèle. Rien n'est jamais acquis définitivement, les structures s'« usent », l'entropie fabrique mécaniquement du désordre quoi qu'on fasse, aucun des processus naturels ou artificiels n'y échappe, tout se reformule car la situation elle-même évolue. Le hasard et la chance n'y ont pas leur place, ni les joueurs de poker.

La méthode de résolution des problèmes en situations complexes doit pouvoir être enseignée tant dans les grandes écoles d'ingénieurs que dans les écoles de commerces, et d'une façon générale là où se forment les décideurs, en réfléchissant sur des scénarios comme ceux évoqués dans cette introduction. Tous seront confrontés tôt ou tard à des situations où seule l'intelligence collective pourra donner des éléments de réponses acceptables par la multitude. Pour cela, la méthode doit être « décontextualisée » [en informatique, on dirait "*context free*"] de façon à en faire émerger les concepts qui la sous-tendent, mais sans jamais perdre le lien avec la réalité, ce qui la stériliserait immédiatement. Cette intelligence collective est plus qu'une simple addition, c'est une intégration de compétences qui émergent grâce aux interactions organisées des différents champs disciplinaires, sciences humaines comprises. "*More is different*" disait le prix Nobel Philip Anderson dans un article resté célèbre, voilà ce à quoi il faut nous préparer dans les sciences de l'ingénierie des systèmes ouverts du 21^{ème} siècle où l'humain, plus que jamais, a toute sa part.

³⁶ J'emprunte ce terme au logicien Jean-Yves Girard ; voir son site.

³⁷ Voir D.Meadows & alii, *Beyond the limits*, 1992, ISBN 0-930031-55-5 ; et aussi R.Kurzweil, *The singularity is near*, 2005, Penguin, pour redevenir optimiste, mais à manipuler avec des pincettes car c'est le *Chief scientist* chez Google, accessoirement adepte du transhumanisme et de l'humanité H+.

³⁸ Voir le livre de Martin Nowak, professeur à Harvard, *Super cooperators – Beyond the survival of the fittest; why cooperation, not competition, is the key to life*, Cannon gate books, 2011.

Dans l'autobiographie d'Alexandre Grothendieck, vraie génie des mathématiques et fondateur de la Géométrie algébrique moderne, page 48 de *Récoltes et semailles*³⁹, il y a un petit texte tout à fait illustratif de la méthode à mettre en pratique pour quiconque veut se confronter sérieusement aux systèmes qui nous environnent de toute part, ceux que nous créons, et ceux qui nous sont donnés. Nous pouvons le reprendre tel quel, sans en changer un mot :

« La structure d'une chose n'est nullement une chose que nous puissions "inventer". Nous pouvons seulement la mettre à jour patiemment, humblement en faire connaissance, la "découvrir". S'il y a inventivité dans ce travail, et s'il nous arrive de faire oeuvre de forgeron ou d'infatigable bâtisseur, ce n'est nullement pour "façonner", ou pour "bâtir", des "structures". Celles-ci ne nous ont nullement attendues pour être, et pour être exactement ce qu'elles sont ! Mais c'est pour exprimer, le plus fidèlement que nous le pouvons, ces choses que nous sommes en train de découvrir et de sonder, et cette structure réticente à se livrer, que nous essayons à tâtons, et par un langage encore balbutiant peut-être, à cerner. Ainsi sommes-nous amenés à constamment "inventer" le langage apte à exprimer de plus en plus finement la structure intime de la chose mathématique, et à "construire" à l'aide de ce langage, au fur et à mesure et de toutes pièces, les "théories" qui sont censées rendre compte de ce qui a été appréhendé et vu. Il y a là un mouvement de va-et-vient continu, ininterrompu, entre l'appréhension des choses, et l'expression de ce qui est appréhendé, par un langage qui s'affine et se re-crée au fil du travail, sous la constante pression du besoin immédiat ».

Que dire de mieux ... ?!

☞ La systémique, science de la régulation et de l'équilibre des systèmes, science de la finalité et de l'intégration en fonction d'un but clairement spécifié [le cœur du modèle, son invariant fondamental] dans un environnement localement imprévisible mais globalement déterministe comme nous l'enseigne la physique, doit enfin trouver la place que Norbert Wiener et ses collègues lui avaient assignée, une place au premier rang, pour résoudre les problèmes globaux auxquelles notre société mondialisée et ouverte est désormais confrontée. Les solutions ne pourront pas être autres que locales et coopératives. Il ne peut pas y avoir de centre, car UN seul centre est un point de fragilité incompatible avec une société humaine réellement durable.

☞ Coopérer ou périr, telle est la question, mais aussi le message d'espoir de la systémique.

A bien des égards, ce début du 21^{ème} siècle ressemble aux années 50, pleines de risques et de promesses.

→ Si nous n'organisons pas la complexité, la complexité nous détruira.

³⁹ N'est disponible que sur Internet.

Education

A titre d'exemple nous donnons un bref aperçu de la chronologie et des étapes principale le l'enseignement en science des systèmes au MIT, non par admiration béate de cette célèbre institution, mais pour faire réfléchir ceux qui ont la lourde responsabilité d'organiser les enseignements d'ingénierie. La continuité de l'effort est impressionnante, sans équivalent en France, sauf à remonter à l'époque des débuts de la Révolution Industrielle et à la fondation des Grandes Ecoles, hors de l'Université qui ne voulait pas de ces disciplines jugées ancillaires [pour rester poli !].

☞ Officially founded in 1998, ESD, *Engineering Systems Division*, is rooted in decades of developments moving toward interdisciplinary approaches to engineering systems problems.

1948 MIT professor Norbert Wiener publishes *Cybernetics*

1954 Henry M. Paynter establishes one of the first systems courses

1961 Jay Forrester publishes *Industrial Dynamics*

1971 Alfred H. Keil establishes the Center for Policy Alternatives

1973 Center for Transportation Studies is founded

1975 Technology and Policy Program is founded

1985 Center for Technology, Policy, and Industrial Development is formed

1988 Leaders for Manufacturing Program is launched

1989 MIT Commission on Industrial Productivity publishes "*Made in America*"

1991 Technology, Management, and Policy Program (TMP) PhD is founded

1993 The School of Engineering Publishes "*Engineering with a Big E*"

1996 The Eagar Committee recommends the creation of ESD

1996 MIT's System Design and Management Program is founded

1998 Master of Engineering in Logistics Program is founded

1998 The Engineering Systems Division is founded

2000 First tenured dual faculty hired by ESD

2004 **First International Engineering Systems Symposium** at MIT

2004 ESD Doctoral Program is established, incorporating the TMP

2004 Council of Engineering Systems Universities is launched

2008 Two dual junior faculties tenured at ESD

2009 Two faculties from MIT School of Architecture + Planning join ESD; the division now has faculty with appointments in all five MIT schools

2009 MIT Center for Biomedical Innovation joins ESD

2009 **Second International Engineering Systems Symposium** at MIT

...

En France, pour avoir une masse critique équivalente, il faudrait imaginer un regroupement coordonné sur le plan pédagogique de l'Ecole Polytechnique et de ses écoles d'applications, en gros ParisTech, de l'Ecole Centrale, incluant l'intergroupe, et de SupElec qui viennent également de se regrouper, et des écoles de management type INSEAD, HEC ou ESSEC ; sans oublier le Cnam et la formation « tout au long de la vie ». L'histoire a été différente du fait de la dispersion des forces et des rivalités « gauloises », mais les réalisations ont été imposantes, du moins dans la période des « Trente Glorieuses », ce qui est le principal, mais au prix d'un gaspillage d'énergie considérable.

La révolution de l'informatisation massive et du numérique, l'omniprésence des MOOC, va exiger une refondation des enseignements de l'ingénierie où la science des systèmes tiendra une place centrale. Il est donc temps de « s'y mettre » avant qu'il ne soit trop tard, pour éviter le déclasserment. Ce que fait le MIT, entre autre, est une incitation à ne pas s'endormir.