

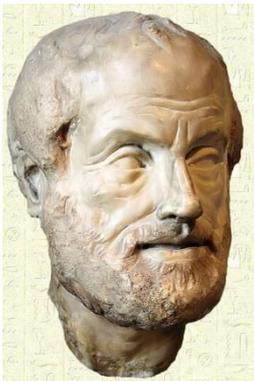
Science et Nature : l'ordre dans le chaos ?

La compréhension de la nature et des phénomènes qui s'y déroulent est un sujet central depuis que le monde est monde, sans doute parce qu'elle est intimement liée à la recherche de sécurité, besoin qui arrive en deuxième position juste après les besoins physiologiques dans la célèbre pyramide des besoins.

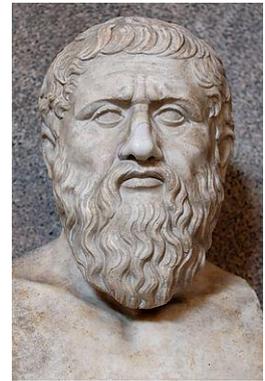
Anticiper le futur immédiat afin de s'en prémunir ou d'en tirer bénéfique, comprendre pourquoi certains événements se produisent et d'autres pas, sécuriser les moyens de subsistance, développer les pharmacopées, autant de problèmes que les premières sociétés ont eu à gérer. Aussi les premiers champs d'investigation ciblaient-ils la météo, la botanique, la zoologie. Très tôt, il est apparu que la simple observation de la nature et des phénomènes qui s'y déroulaient ne suffisait pas : non seulement l'immense variété du monde rendait la tâche titanesque mais encore la collection d'observations ne permettait de créer que des liens superficiels. Quant à la causalité, elle était hors d'atteinte de ce type d'approche. Les religions primitives ont contourné le problème par l'introduction de dieux multiples censés être responsables du fonctionnement de la nature. Mais cette position ne pouvait rester longtemps satisfaisante.



1. Les débuts de la modélisation : un chemin semé d'embûches



Pour autant l'accès à l'essence des choses ne fut pas un chemin aisé. Pour Aristote, l'essence était forcément incarnée : y accéder devait se faire par intuition à partir d'une stricte étude du sensible (de la réalité). Pour Platon, l'essence ou idée (eidos) était un être existant indépendamment du sensible. Le monde réel n'était alors qu'une projection imparfaite du monde des idées, projection perçue au travers du filtre des sens qui introduit



lui-

même des distorsions.

Ces deux conceptions se retrouvent dans toute science : l'observation et la mesure sont les moteurs de l'intuition qui fait naître la modélisation. Cette dernière sera correcte si tant est que les données collectées sont valides et non biaisées par les sens.

La difficulté d'avoir une matière première de qualité qui peut permettre l'éclosion de modélisations correctes vient essentiellement de **perceptions fausses** :

- **pour cause d'instruments d'observations inadéquats.** A notre échelle, la matière apparaît comme continue. Or à l'échelle atomique, le vide prédomine. Le noyau atomique est 100 000 fois plus petit

que l'atome : si le noyau était une orange, les électrons graviteraient à 5km de celle-ci. Il a fallu attendre 1905 et l'expérience de Jean Perrin sur le mouvement brownien pour avoir une preuve visible de l'existence des atomes. La mise en évidence de la structure interne des atomes ne viendra qu'ultérieurement. En astronomie, il a fallu attendre Ticho Brahe (1546-1601) pour avoir enfin des mesures stellaires précises à la minute d'angle, ce qui a permis à Kepler de formuler ses fameuses trois lois. Aujourd'hui l'observation de la matière en champ gravitationnel intense qui permettrait de tester certaines prédictions de la relativité générale non encore illustrées expérimentalement à ce jour nécessiterait un télescope 2000 fois plus précis que Hubble : il devrait être capable de distinguer l'horizon de Sagittarius A, un trou noir de 4 millions de masses solaires, le plus proche de notre planète, qui ne mesure vu de celle-ci que 50 micro secondes d'arc (c'est la taille d'un DVD posé sur la Lune et observé à l'œil nu depuis la Terre). Cet instrument n'existe pas encore. Mais ces quelques exemples permettent de comprendre l'ampleur des difficultés techniques auxquelles sont confrontés les physiciens expérimentaux.

- **pour cause de limitations physiques liées à notre caractère humain.** Nous percevons le temps comme de nature différente de l'espace. Or si nous nous déplaçons à une vitesse proche de la lumière, nous réaliserions que cette dimension est de nature similaire aux dimensions d'espace comme le détaille Einstein dans sa géniale théorie de la relativité. Imaginons que nous soyons assujettis à nous déplacer dans un plan (donc à deux dimensions). Si nous observons un objet à trois dimensions, nous pourrions mesurer sa largeur et sa hauteur à l'aide d'une règle. Par contre, nous serions forcés de mesurer sa profondeur en effort d'accommodation de l'œil puisque nous ne pouvons pas faire le tour de l'objet. Nous en concluons que la profondeur est de nature différente de la largeur et de la hauteur. C'est la même chose pour notre perception du temps : nous percevons le monde en dimension 3 à l'intérieur d'un univers en dimension 4.
- **Pour cause d'interaction avec le système étudié.** En effet dans quelle mesure lorsque nous étudions un phénomène le perturbons nous par le fait même de l'étudier ? Si nous mesurons la vitesse d'une voiture à l'aide d'un radar LASER, nous envoyons des photons sur le véhicule, ces photons sont réfléchis par le véhicule et la mesure du temps de l'aller-retour donne la vitesse. L'impact d'un photon sur une voiture d'une tonne et demi ne perturbe pas le mouvement de celle-ci de manière perceptible. Imaginons maintenant que nous fassions de même pour mesurer la vitesse d'un électron : l'impact d'un photon va infléchir la trajectoire de ce dernier. La mesure va donc modifier le système étudié : quel est alors le sens ou la valeur de cette mesure ? C'est ce type de problème que doit gérer la mécanique quantique, étude de l'infiniment petit et autre théorie majeure du XXème siècle.

2. Qu'est-ce qu'une modélisation ?

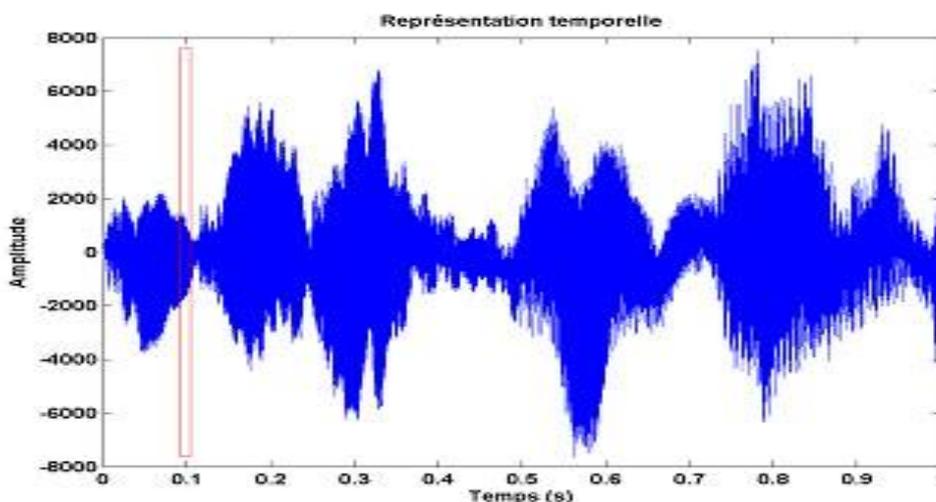
Une modélisation est une représentation d'objets, de structures ou de situations du monde réel. Quand le modèle est bon, une simulation basée sur ce dernier donne des résultats en accord avec les observations. Le réel étant souvent très complexe, les modélisations - d'évolution notamment - seront faites à partir d'objets eux-mêmes représentés par le biais de modèles simplifiés. Le degré de simplification devra être en accord avec la précision souhaitée quant aux résultats fournis par la simulation. La capacité à maîtriser le degré d'approximation et à le chiffrer est ici primordiale. Comment en effet, valider une modélisation si l'on n'est pas capable de chiffrer toute la chaîne d'erreurs inhérentes à tout processus expérimental ? Un écart apparemment anodin entre théorie et pratique a souvent été dans l'histoire des sciences à l'origine d'une remise en cause complète de théories jusque-là établies. Le diable se cache dans les détails !

Il existe divers niveaux de modélisation : mise en forme de données, modèles architecturaux, modèles relationnels... le degré d'abstraction nécessaire à leur maîtrise augmente rapidement avec la pluridisciplinarité de ceux-ci. Il est par exemple impossible de comprendre en profondeur la mécanique quantique sans un solide niveau en algèbre linéaire, la relativité ne se formule qu'à travers des représentations tensorielles et jongle avec les espaces courbes. Aujourd'hui aucun physicien théoricien sérieux ne peut travailler sa matière sans un bagage mathématique conséquent.

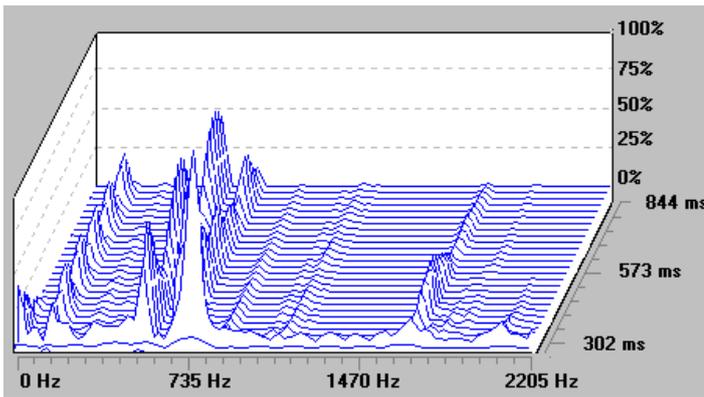
Certains modèles sont totalement déconnectés de la réalité (du moins apparemment) et on rentre alors dans le domaine spéculatif : ils y resteront à jamais ou jusqu'à ce que les progrès techniques permettent leur validation expérimentale (théorie des cordes, trous de vers, singularités nues...).

La modélisation travaille hors du monde sensible pour reprendre la terminologie aristotélicienne. Elle crée des objets sans équivalents dans notre monde réel. Ces objets se définissent par les règles qui les pilotent mais sont difficiles à appréhender par le commun des mortels parce qu'on ne peut espérer les comprendre réellement : au mieux on s'y habitue. Ce n'est qu'avec le temps que des concepts aussi étranges qu'un spin, une saveur de quark, un rotationnel, un espace dual, une convolution semblent devenir tangibles à nos yeux.

Une modélisation est-elle unique ? Prenons l'exemple de la musique. Je peux l'enregistrer à l'aide d'un micro et obtenir un graphe dit temporel représentant une tension en fonction du temps. C'est une modélisation du son et c'est fort utile si je veux enregistrer et reproduire ce son.



Mais si je veux comprendre ce qu'est un son grave ou aigu, ou pourquoi un son de piano diffère d'un son de trompette alors qu'on joue la même note, cette modélisation n'est d'aucune utilité.



Il faut faire appel à une représentation fréquentielle basée sur l'analyse de Fourier qui fait apparaître toutes les composantes d'un son donné. Cette analyse spectrale à la base du traitement du signal est très largement utilisée dans la synthèse de sons mais aussi dans les divers modèles de compression musicale (mp3...)

Ceci dit si je suis psycho acousticien, une modélisation en onde de pression sera plus appropriée pour comprendre les interactions avec l'oreille humaine.

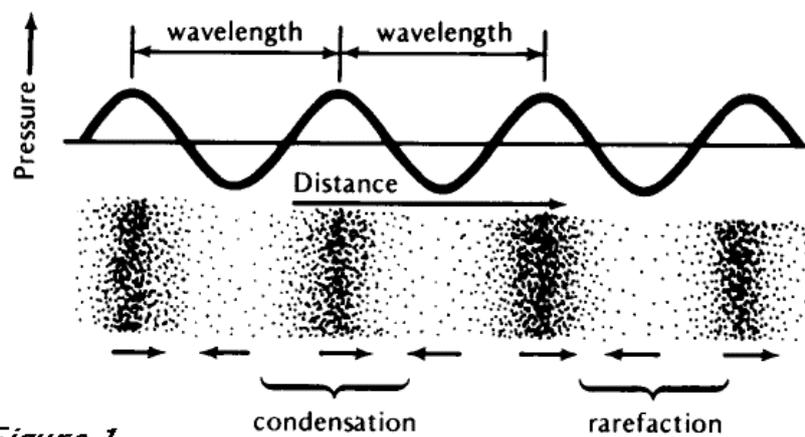


Figure 1

Toutefois ces deux modélisations physiques ne me seront d'aucune utilité si je suis musicien. Des modélisations basées sur la théorie musicale seront plus appropriées. La représentation au moyen d'une partition me donnera toutes les informations nécessaires : notes, nuances, rythme, tempo... Mais si je suis jazzman et que je souhaite improviser, une représentation par le biais d'une grille avec codes d'accords me sera beaucoup plus utile afin de lire au premier coup d'œil les diverses tonalités et modulations.

CLAIR DE LUNE

opus: Suite bergamasque · Eschikien 1905
Komponiert 1890

Andante très expressif Lecture Nr. 157

*) François Lescaq, Catalogue des Œuvres de Claude Debussy, Grad 1907
Version MIDI composée par Jean-François Lescaq
© 1983 by G. Henle Verlag, München

22
ALL THE THINGS YOU ARE
— JEROME KERN / OSCAR HAMMERSTEIN II

INTRO $E^b7^{\#9}$ $D7^{\#9}$

HEAD $G-7$ $C-7$ $F7$ $Bbmaj7$

$Ebmaj7$ $A7$ $Dmaj7$

$D-7$ $G-7$ $C7$ $Fmaj7$

$Bbmaj7$ $B-7b5$ $E7$ $A^{\#}maj7$ $F^{\#}7^{\#5}$

$B-7$ $E7$ $A^{\#}maj7$

$G^{\#-7b5}$ $C^{\#}7$ $F^{\#}maj7$ $D7^{\#5}$

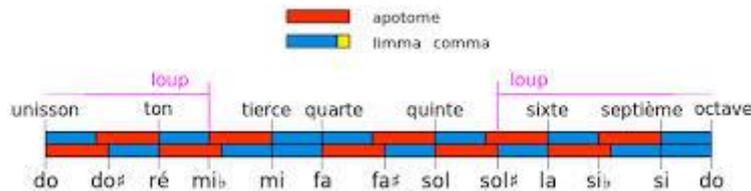
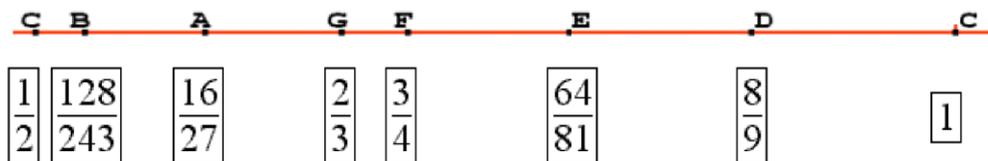
$G-7$ $C-7$ $F7$ $Bbmaj7$

$Ebmaj7$ $A^b7(13)$ $D-7$ $C^{\#}7$

$C-7$ $F7$ $Bbmaj7$ $(A-7b5 D^b7^{\#9})$

Copyright © 1939 UNIVERSAL - POLYGRAM INTERNATIONAL PUBLISHING, INC.
Copyright Renewed

Nous pourrions aussi citer l'approche mathématique en fractions continues qui seule permet de comprendre comment sont construites les gammes, ce que représente réellement le comma (ce petit écart qui chiffre la différence entre un dièse et un bémol) ou certaines techniques d'accordeurs qui accordent légèrement « faux » afin que le piano sonne juste (décalage de la quinte du loup initialement entre fa et do qu'on reporte sur un intervalle moins utilisé mib sol#).



Ce bref exemple illustre la non-unicité de la modélisation et le lien indissociable entre modélisation et champ d'application.

3. La modélisation scientifique comme moyen d'ordonner le chaos

3.1. Une première approche dite structurale

Elle consiste à aller vers l'infiniment petit pour ramener la diversité du monde que nous percevons à quelques éléments constitutifs simples. L'ordre naît de la filiation : tout se ramène à une racine basique. Cette approche répond à la question : **qu'est-ce que... ?**



Notre univers présente une variété quasi-infinie. Nous pouvons le morceler en domaines, puis en sous domaines, puis en sous sous domaines afin de tenter de faire émerger une structure. A l'intérieur de chaque domaine nous pouvons tenter d'inventorier tout ce qui y est présent. Cette approche très en vogue chez les naturalistes et autres géologues du XVIII^e siècle leur avait valu le qualificatif peu glorieux de collectionneurs de timbres par le truculent Lord Kelvin. Elle aboutit presque toujours à des classements de plus en plus complexes et peu satisfaisants. Cela s'apparente plus à un titanesque rangement

qu'à un ordonnancement réel. Ce n'est pas parce que je suis capable de séparer les poêles des casseroles dans une cuisine que je suis capable d'expliquer le pourquoi de leur forme ou leur usage. Il faudra attendre la découverte de l'ADN puis les progrès du séquençage pour dresser une cartographie des génomes de chaque espèce (travail non encore achevé à ce jour mais qui a beaucoup avancé avec la baisse des prix des ordinateurs puissants et avec l'avènement des bases de données et du « big data »). Ceci dit les bases d'acides aminés composant l'ADN sont encore des molécules complexes. C'est en poussant la modélisation atomiste qu'on peut tout ramener à une racine commune : toute matière est composée d'un nombre fini d'atomes. Mais c'est encore trop varié : les atomes eux-mêmes ont été modélisés comme composés de protons, neutrons et électrons. Cette représentation a permis à Mendeleïev d'ordonner les atomes dans son célèbre tableau universellement utilisé encore de nos jours.

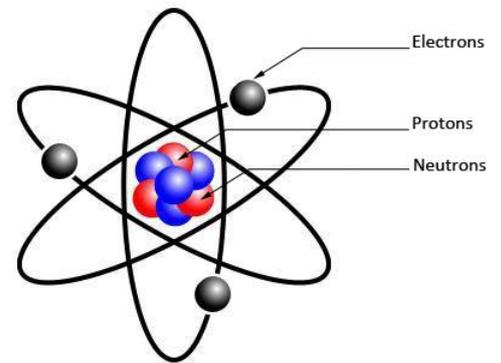


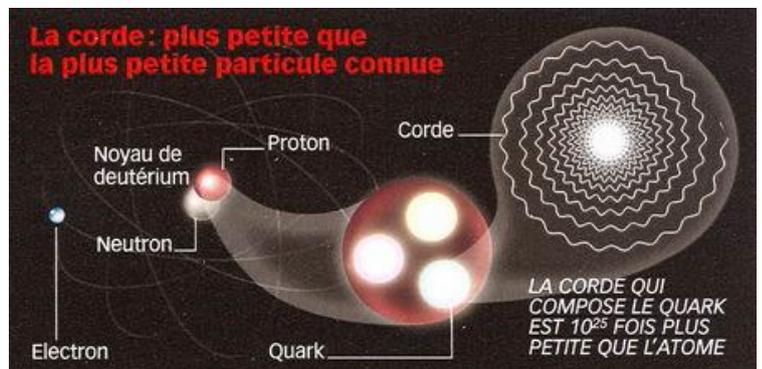
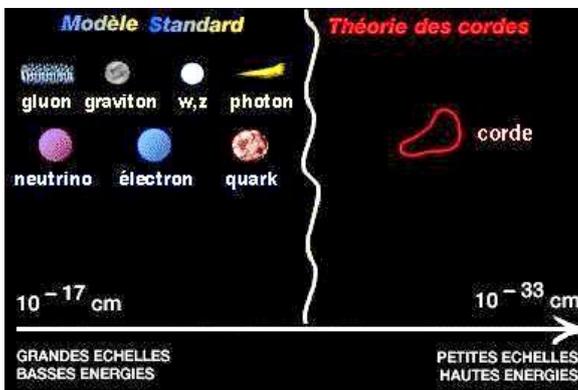
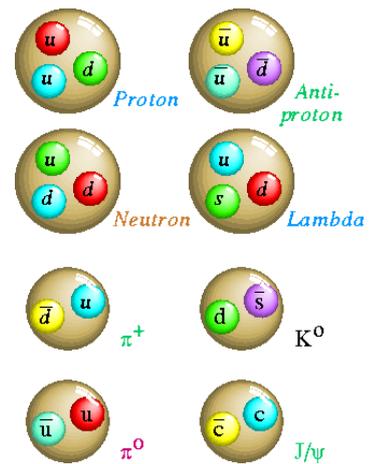
tableau-periodique.fr

Légende:

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Métaux pauvres
- Métalloïdes
- Halogènes
- Gaz nobles
- Lanthanides
- Actinides

| PERIODE | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1 | 1 H | 2 He | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne |
| 3 | 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar |
| 4 | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 5 | 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe |
| 6 | 55 Cs | 56 Ba | 57 La | 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu | 86 Rn |
| 7 | 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr | 118 Uuo |

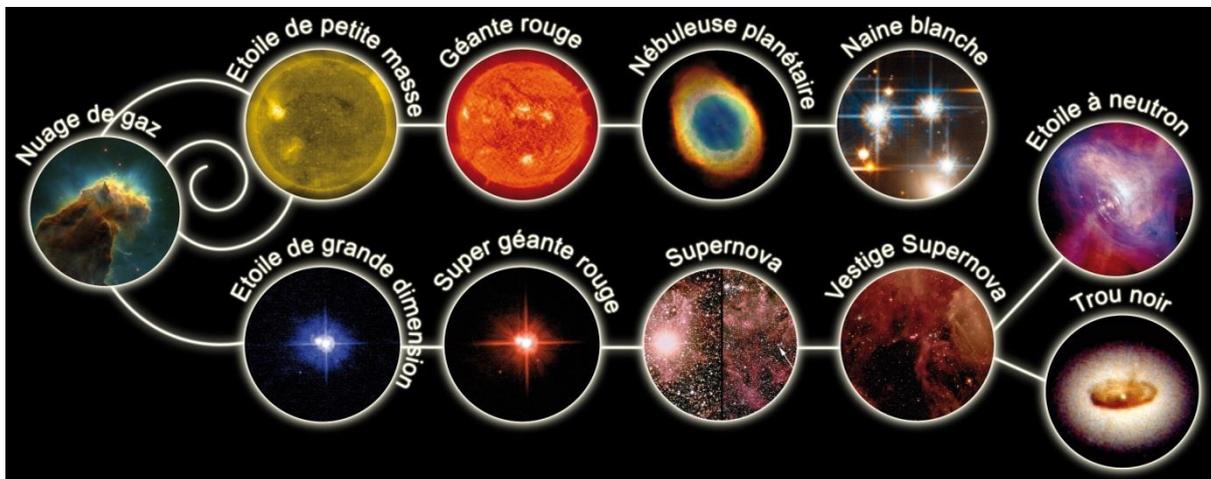
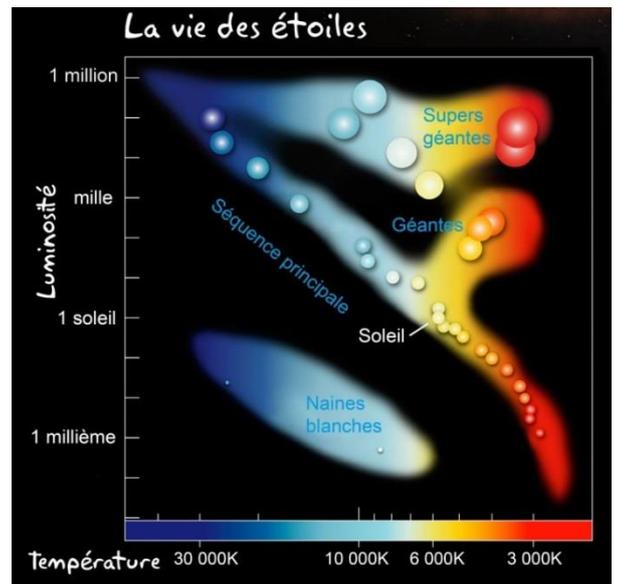
Nos connaissances progressant, de nombreuses particules ont été découvertes au cours d'expériences dans des accélérateurs de particules toujours plus puissants : le chaos renaissait. La théorie des quarks composant ultimes des hadrons dont les protons et neutrons sont deux exemples a permis de remettre un peu d'ordre. Mais il subsistait encore beaucoup trop de composants élémentaires (les quarks, les leptons...) pour passer le fil du rasoir d'Occam d'où de nouvelles modélisations comme la théorie des cordes. Suivant cette dernière, les composants ultimes de tout l'univers seraient des cordelettes vibrantes et ce que nous percevons comme des particules différentes ne seraient que des cordes vibrant à des fréquences différentes (c'est très simplifié). La corde qui compose le quark est 10^{25} fois plus petite que l'atome (10^{21} est le rapport entre la taille de la voie lactée et celle d'un homme, 10^{25} serait le rapport entre le grand mur de Sloan, 3^{ème} plus grand super amas de l'univers et l'homme)



3.2. Une deuxième approche dite relationnelle

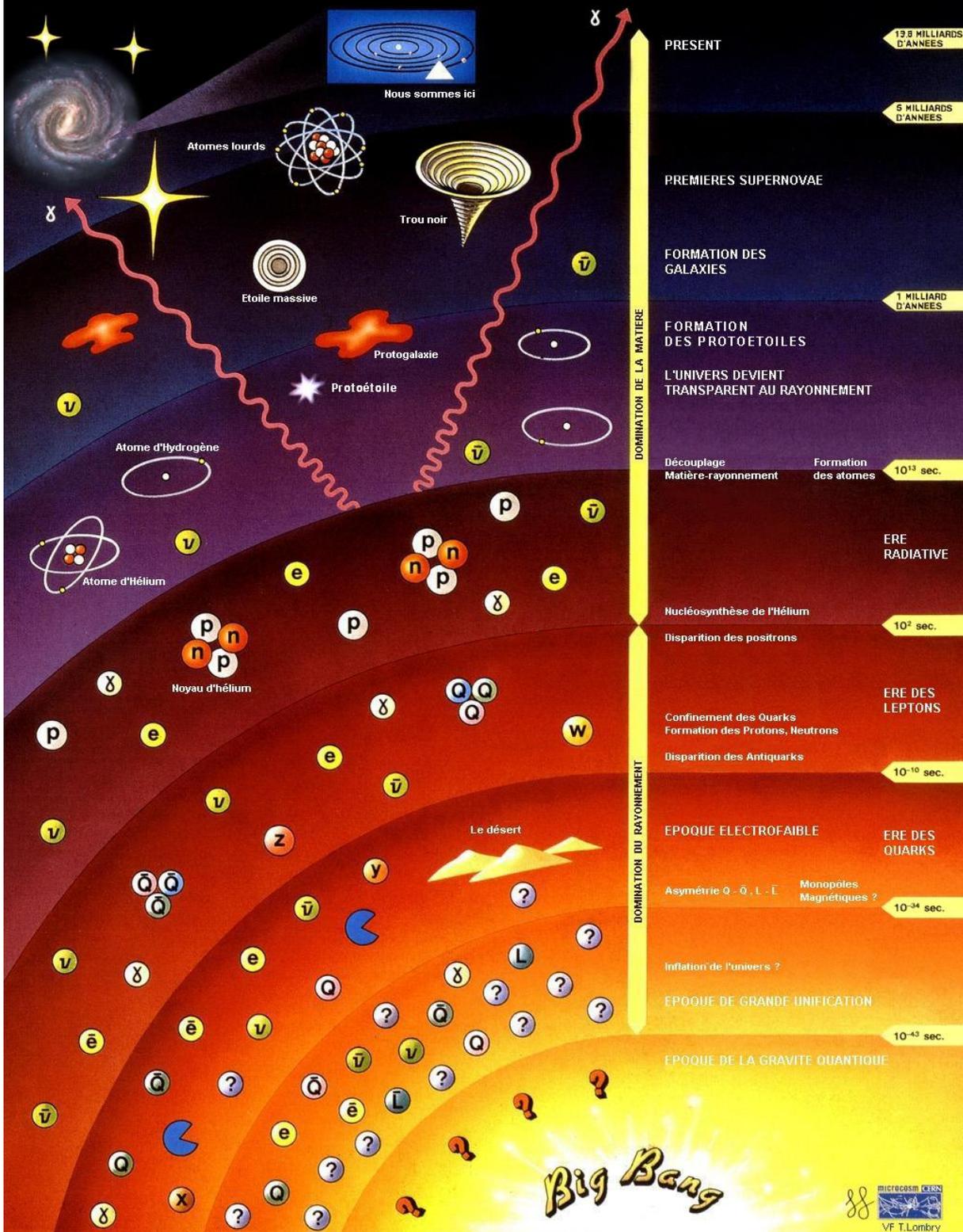
Elle consiste à structurer le chaos à l'aide de lois d'évolution. L'ordre naît ici du lien établi entre les objets. On s'intéresse moins à la composition des objets qu'à leur évolution, aux bifurcations qui jalonnent leur histoire, qui parfois modifient leur essence même, entraînent leur disparition, donnent naissance à de nouveaux objets. Cette deuxième approche est un peu à l'approche structurale ce que la dynamique (étude des mouvements sous l'effet des forces) est à la cinématique (étude descriptive du mouvement tel qu'il est sans étudier ses causes). Ce sont les lois d'évolution qui permettent de lier des événements, de comprendre l'état actuel de l'univers et de prévoir (du moins en partie) des scénarios d'évolutions futures. Cette approche répond à la question **pourquoi... ?**

Regardons le ciel : astéroïdes, comètes, planètes, étoiles, naines blanches, géantes rouges, étoiles à neutrons, trous noirs, novæ et supernovæ, pulsars...cet inventaire à la Prévert donne un petit aperçu de la variété des corps célestes. Là encore les modèles de séquence de vie des étoiles ont permis d'ordonner et de trouver un lien entre tous ces objets. Les étoiles constituées principalement d'hydrogène se contractent sous l'effet de leur propre gravité. Cette contraction s'accompagne d'une augmentation de pression et de température. A partir d'un certain seuil, les hydrogènes se recombinent pour donner de l'hélium, cette synthèse libérant assez d'énergie pour contrecarrer la contraction de l'étoile. C'est le stade actuel de notre soleil. Une fois l'hydrogène épuisé, la contraction reprend, la température augmente à nouveau, la synthèse se poursuit vers le carbone. A la fin de leur vie, les étoiles s'éloignent de cette séquence principale pour aller visiter d'autres régions de ce diagramme. Pour les étoiles de faible masse comme le soleil, cela se traduit par une expansion de l'étoile qui s'accompagne d'un refroidissement en surface donc un décalage vers le rouge : ce sont les géantes rouges. Puis les couches externes sont expulsées, formant ainsi les nébuleuses planétaires, comme l'anneau de la Lyre, et laissant une petite étoile naine blanche au centre. Les étoiles de forte masse finissent leur vie elles aussi par une forte expansion (super géantes rouges) mais celle-ci se termine par une grande explosion que l'on appelle supernova et qui laisse de jolis restes à observer. Au centre, le reste de l'étoile finira soit en étoile à neutrons ou, pour les plus massives, en trou noir.



Nous pourrions remonter plus loin et parler de toute la période qui précède la naissance des étoiles. C'est la théorie du Big Bang.

L'Histoire de L'Univers



Nous pourrions aussi parler de la théorie de l'évolution des espèces, de la tectonique des plaques, des modèles climatiques...la liste est sans fin et chaque voile levé sur des « mystères » de la nature révèle de nouveaux problèmes à résoudre.

3.3. Une troisième approche dite « exploratrice »

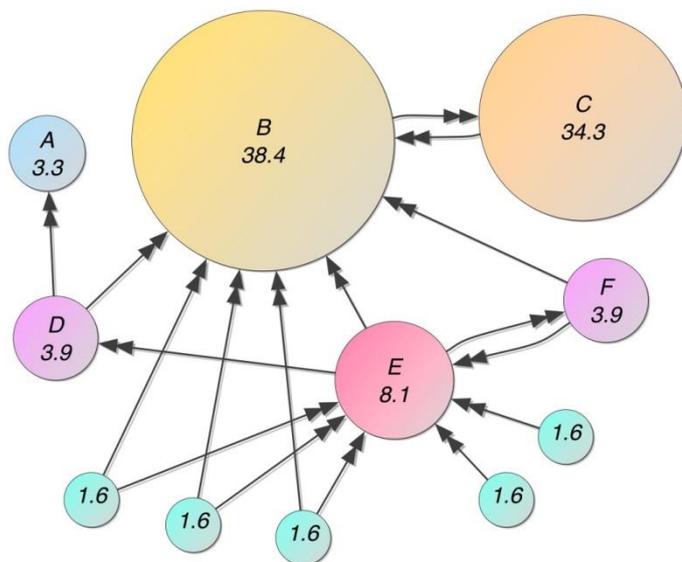
Elle est radicalement différente des précédentes. Elle n'a pour but ni de structurer le chaos, ni d'analyser ses composantes ultimes, ni de trouver ses lois d'évolution mais d'arriver à extraire rapidement des informations pertinentes dans le monde tel qu'il est. On ne travaille pas ici sur une manière d'ordonner le monde mais sur la façon de s'y retrouver en le laissant en l'état. Cette approche répond à la question où... ?

Les informations accessibles ont augmenté exponentiellement depuis le temps de premiers ouvrages recopiés à la main. Une accélération stupéfiante a eu lieu avec l'explosion d'internet, accélération qui ne faiblit pas avec l'augmentation d'objets connectés, le développement des clouds, la dématérialisation des services. On ne parle plus d'ailleurs de données mais de big data aujourd'hui, terme fort pertinent pour traduire la masse d'informations à laquelle



nous avons accès. Structurer internet à la manière d'une bibliothèque aurait été impossible car ça aurait supposé l'existence d'administrateurs pilotant le développement et d'une méthode de classement. Internet aurait pu être le lieu de l'anarchie la plus totale puisque nous aurions très vite été incapables de retrouver la moindre information. Ce sont les moteurs de recherche qui ont structuré ce chaos apparent et le plus bel exemple est Google et son fameux algorithme pagerank.

En attribuant des poids aux pages en fonction des liens qu'elles contiennent ou des liens qui pointent vers elles et en utilisant une modélisation en matrice de transition de chaîne de Markov couplée avec une représentation en matrices creuses, Google réussit à trier les pages de façon à présenter en quelques centièmes de secondes une liste étonnamment pertinente eu égard aux requêtes effectuées. C'est une prouesse technique stupéfiante quand on sait que 822000 nouveaux sites internet sont mis en ligne chaque jour et que nous ne sommes pas capables de compter le nombre de pages web disponibles (entre 2 et 1000 milliards !).



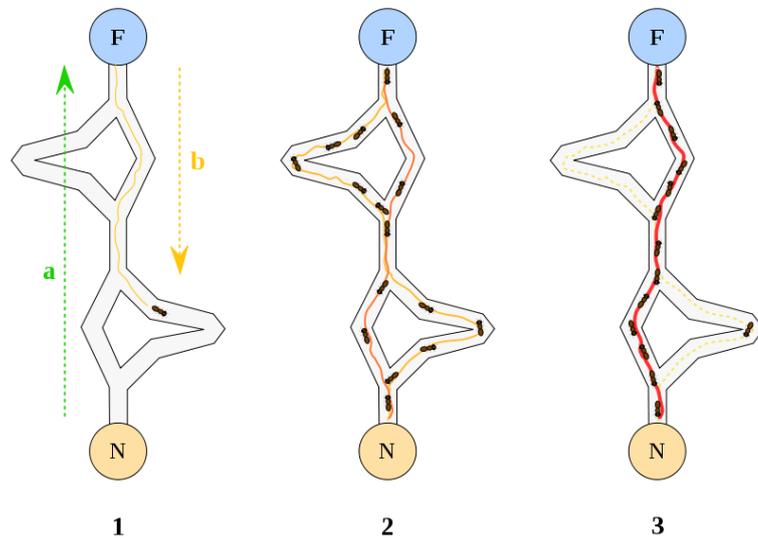
3.4. Une quatrième approche dite « d'aide à la décision »

Dans la lignée de l'approche précédente, cette dernière cherche non pas à trouver une information mais face à une question donnée, fournir une aide au choix parmi les réponses possibles sans avoir à ordonner le système ou à maîtriser toutes les équations le régissant. L'idée qui pilote cette approche est que les systèmes réels font intervenir tellement de paramètres, sont sujets à tellement de perturbations qu'une approche strictement déductive partant des éléments constitutifs et leur appliquant les lois générales régissant leur évolution est vouée à l'échec. Quand la masse d'informations à traiter dépasse nos capacités de calcul, que la précision nécessaire à une simulation correcte nous est inaccessible (soit techniquement soit par essence même comme en mécanique quantique), il faut changer d'approche.

On peut par exemple procéder en transférant des procédés naturels à des problèmes apparemment complètement différents. En effet, nous pouvons voir que certains problèmes complexes sont résolus au quotidien par des espèces sociales du règne animal qui disposent pourtant de capacités cognitives limitées. L'utilisation de l'algorithme des colonies de fourmis pour résoudre des problèmes tels que celui du voyageur de commerce en est un bel exemple. Une formulation de ce problème est : parmi N villes à visiter, comment choisir l'ordre afin que le chemin total soit le plus court tout en ne passant qu'une seule fois par chaque ville. L'algorithme classique utilisant une modélisation par graphes et diverses méthodes

dérivées de l'algorithme de Dijkstra est très long et le temps de calcul explose dès que le nombre de villes dépasse quelques dizaines.

L'algorithme des colonies de fourmis utilisé dans ce cas est le suivant :



- une fourmi (appelée « éclaireuse ») parcourt plus ou moins au hasard l'environnement autour de la colonie ;
- si celle-ci découvre une source de nourriture, elle rentre plus ou moins directement au nid, en laissant sur son chemin une piste de phéromones ;

ces phéromones étant attractives, les fourmis passant à proximité vont avoir tendance à suivre, de façon plus ou moins directe, cette piste ;

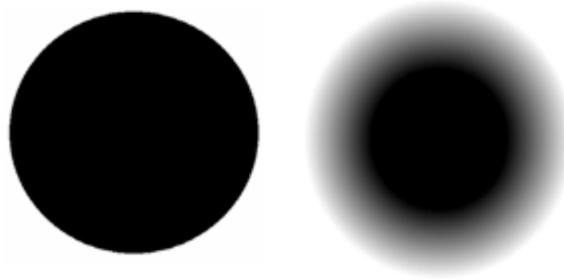
- en revenant au nid, ces mêmes fourmis vont renforcer la piste ;
- si deux pistes sont possibles pour atteindre la même source de nourriture, celle étant la plus courte sera, dans le même temps, parcourue par plus de fourmis que la longue piste ;
- la piste courte sera donc de plus en plus renforcée, et donc de plus en plus attractive ;
- la longue piste, elle, finira par disparaître, les phéromones étant volatiles ;
- à terme, l'ensemble des fourmis a donc déterminé et « choisi » la piste la plus courte.

Il est à noter que ce type de problèmes se résout aussi à l'aide d'algorithmes génétiques qui comme leur nom l'indique sont calqués sur des évolutions d'une population donnée sur plusieurs générations.

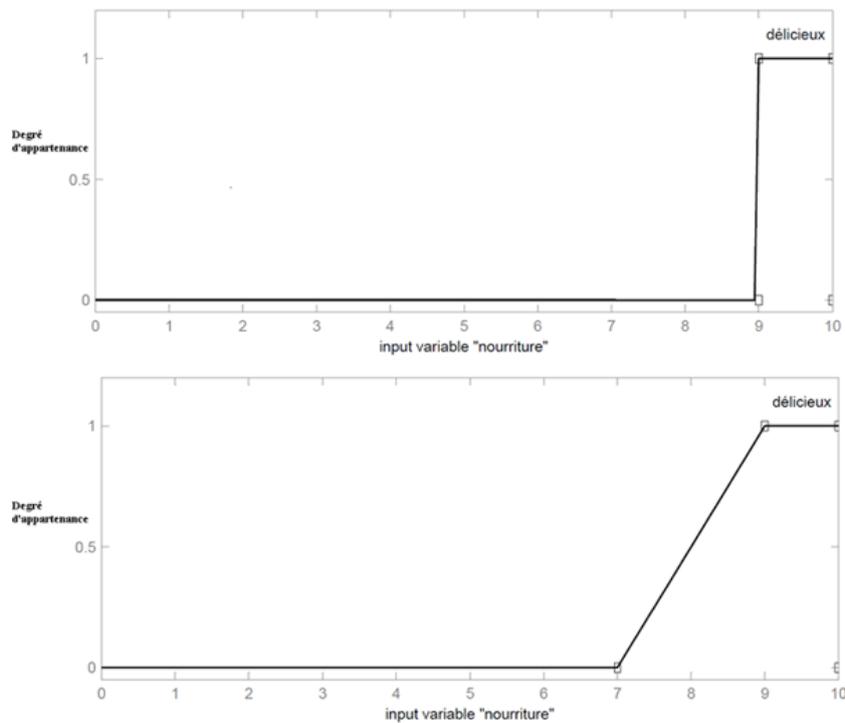
Si cette approche est extrêmement séduisante et efficace, de nombreux problèmes subsistent notamment lorsqu'il s'agit de prouver que la solution vers laquelle les algorithmes convergent est effectivement la bonne.

Dans cette catégorie d'aide aux choix, la logique floue (ou fuzzy logic) s'est installée dans notre quotidien de manière fulgurante sans que nous en ayons toujours conscience. Partant de la machine à laver à capacité variable automatique, des essuie-glaces automatiques en passant par les fours qui s'autoprogramment, les freins ABS, on passe dans le domaine de l'automatique, de la robotique, du contrôle aérien, de la gestion de la circulation routière, de la météorologie, de la prévention des risques, de l'aide au diagnostic médical...la liste des applications est énorme ! Sans rentrer dans les détails, le principe est ici de changer les paradigmes scientifiques afin de permettre de s'attaquer à des problèmes dont la formulation est peu précise. Par exemple, pour les essuie-glaces, nous souhaiterions qu'ils ne fonctionnent pas trop vite lorsqu'il pleut peu mais assez vite dès que la pluie est intense. Si l'esprit humain est très à

l'aise avec ce type de formulation, le passage à la décision physique qui s'en suit est difficile. Le capteur de pluie nous fournit un signal continu aux valeurs bien définies : en terme de tension, comment traduire la phrase « s'il ne pleut pas trop »?

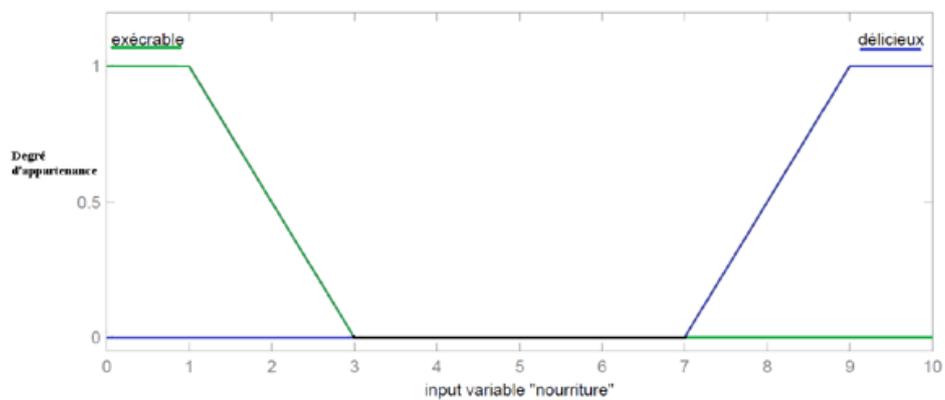


Représentation graphique d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

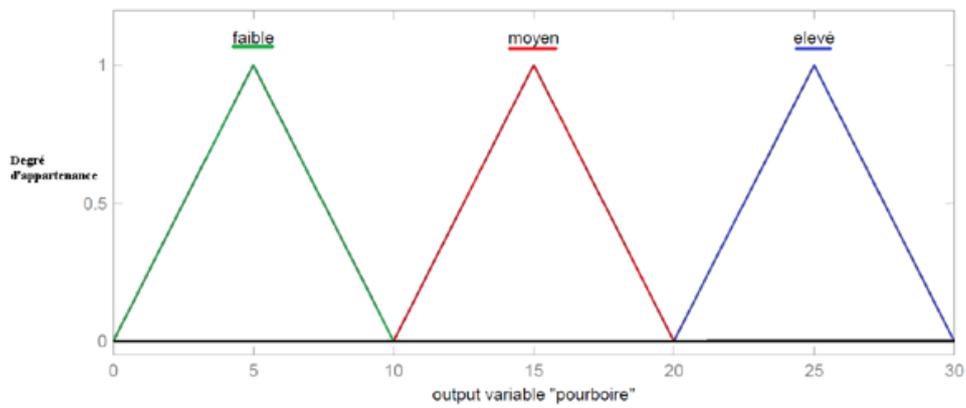


Comparaison entre fonction caractéristique d'un ensemble classique et fonction d'appartenance d'un ensemble flou

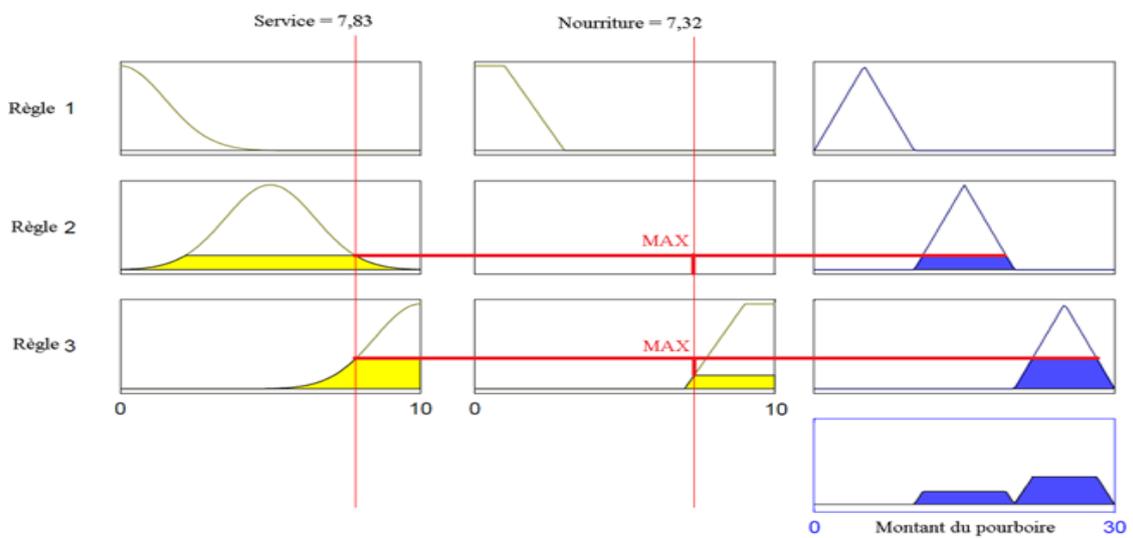
L'introduction de fonctions d'appartenance va permettre de représenter ces énoncés flous.



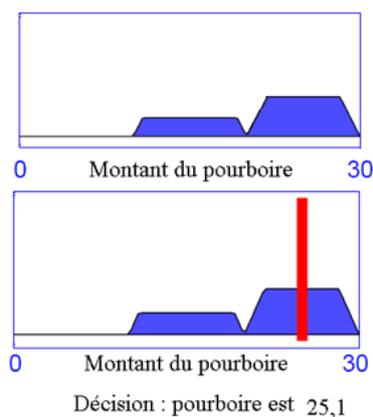
$V = \text{qualité de la nourriture}$
 $X = \mathbb{R}^+$
 $T_V = \{\text{exécrable}, \text{délicieux}\}$



$V = \text{montant du pourboire}$
 $X = \mathbb{R}^+$
 $T_V = \{\text{faible}, \text{moyen}, \text{élevé}\}$



Il faudra bien sûr pour arriver à une décision précise « defuzzyfier » généralement en définissant une sorte de barycentre des diverses décisions possibles.



Nous pourrions aussi parler des réseaux de neurones et de leur efficacité notamment dans le développement cognitif de systèmes automatiques (un logiciel fonctionnant avec un réseau de neurones vient de battre un joueur professionnel de jeu de go !). Les nouvelles approches sont très nombreuses et réellement prometteuses : elles sont toutes symptomatiques d'un rapport nouveau entre science et nature.

4. Conclusion : Science vs chaos, le K.O. ?

Au cours de l'histoire des sciences, l'illusion d'une science venant à bout d'un monde forcément déterministe a été tenace. Cette quasi-certitude de la toute-puissance de la Science a été paradoxalement, plus portée par les non scientifiques que par les scientifiques eux-mêmes, les compagnons les plus fidèles des grands théoriciens étant le doute et l'humilité face à l'étendue de ce qui échappe à notre entendement dans la Nature.

Les grandes théories du XX^{ième} siècle ont, du reste, achevé de laminer les quelques certitudes qui pouvaient subsister quant à la capacité de la science de tout expliquer et de tout prédire. La mécanique quantique, pour ne citer qu'elle, et en particulier Heisenberg avec son principe d'incertitude, a formalisé le seuil auquel s'arrête notre capacité de mesure.

En 1927, le physicien allemand Werner Heisenberg énonce que plus la position d'une particule est déterminée, moins sera précise sa vitesse, et inversement. L'inégalité formelle reliant l'écart type de la position σ_x et l'écart type de la quantité de mouvement σ_p est :

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \frac{h}{4\pi m}$$

où h est la constante de Planck réduite, égale à $6.62 \cdot 10^{-34}$ Js et m est la masse de la particule. Cette équation signifie qu'il est impossible de connaître avec une précision infinie à la fois la position et la vitesse d'un système. Pour connaître avec une précision infinie la position d'un objet, il faudrait l'arrêter et donc par la mesure même de la position, nous perdrons toute information sur sa vitesse. Si à l'échelle macroscopique cette inégalité est sans conséquence eu égard aux ordres de grandeurs (pour une voiture de 1000kg, le deuxième membre est en 10^{-37} , ce qui nous laisse une précision, de 19 décimales pour la position et la vitesse !), à l'échelle atomique, elle devient une barrière très gênante (pour un électron, le deuxième membre est en 10^{-4} !). Il a fallu totalement changer d'approche pour décrire les particules et ce fut l'avènement des fonctions d'onde de probabilité de présence. Les physiciens ne parlaient plus de la position d'une particule mais de chances de la trouver à tel ou tel endroit.

Si on couple le fait de ne jamais connaître exactement l'état d'un système avec la théorie du chaos qui traite de la sensibilité aux conditions initiales de systèmes pourtant rigoureusement déterministes, si nous citons les théories d'indécidabilité qui formalisent l'idée qu'on ne peut pas toujours conclure lorsque l'on se pose une question, même si celle-ci est sous forme logique, ainsi que de nombreuses autres qui amènent toutes aux mêmes conclusions, la réponse à la question d'une science venant à bout du chaos ne peut être que non. Nous pourrions dire que la modélisation crée des îlots d'ordre au milieu d'une mer de chaos, les nouvelles approches extrêmement prometteuses, vues précédemment, nous permettant de naviguer entre ces îlots.

Alors si la communauté scientifique est convaincue de ses limites, d'où vient que ce mythe de toute-puissance subsiste ? Pourquoi le public perçoit-il souvent les scientifiques comme des apprentis sorciers à la source de progrès techniques faits au mépris de la Nature ? Si la prudence et l'humilité doivent piloter tout travail scientifique digne de ce nom, pourquoi tant d'arrogance quand les théories scientifiques sont utilisées comme moyen de clore les débats ?

Il est difficile de répondre à ces questions ; il est toutefois opportun de rappeler deux points fondamentaux :

- Les modélisations, les théorèmes, les théories s'accompagnent de préambules quant à leur application pertinente. Malheureusement, nombre de ceux qui s'en emparent pour les exploiter maîtrisent peu le bagage scientifique nécessaire à leur usage et font peu de cas des préalables nécessaires à leur mise en oeuvre. L'appât du gain, la soif de pouvoir font vite oublier les conditions d'une bonne utilisation des avancées scientifiques. Si la culture scientifique du commun des mortels ne s'arrêtait pas aux concepts du XIX^{ème} siècle, la crédulité quant au pouvoir prédictif et explicatif des sciences ne serait pas si grande.
- La technique n'est pas la science : elle en est le produit. Elle n'a en son sein que le pouvoir structurant que lui ont donné les sciences dont elle découle. Elle est un moyen d'élargir notre champ d'investigation. Mais sans la maîtrise théorique qui lui est sous-jacente, elle n'est qu'une coquille vide, un cache misère donnant une illusion de modernité.

Que les sciences n'aient pas complètement vaincu le chaos de la Nature n'a pas de réelle importance. Les théories les plus riches ont émergé de cet échec, une belle illustration du fait que le chemin compte plus que la destination...