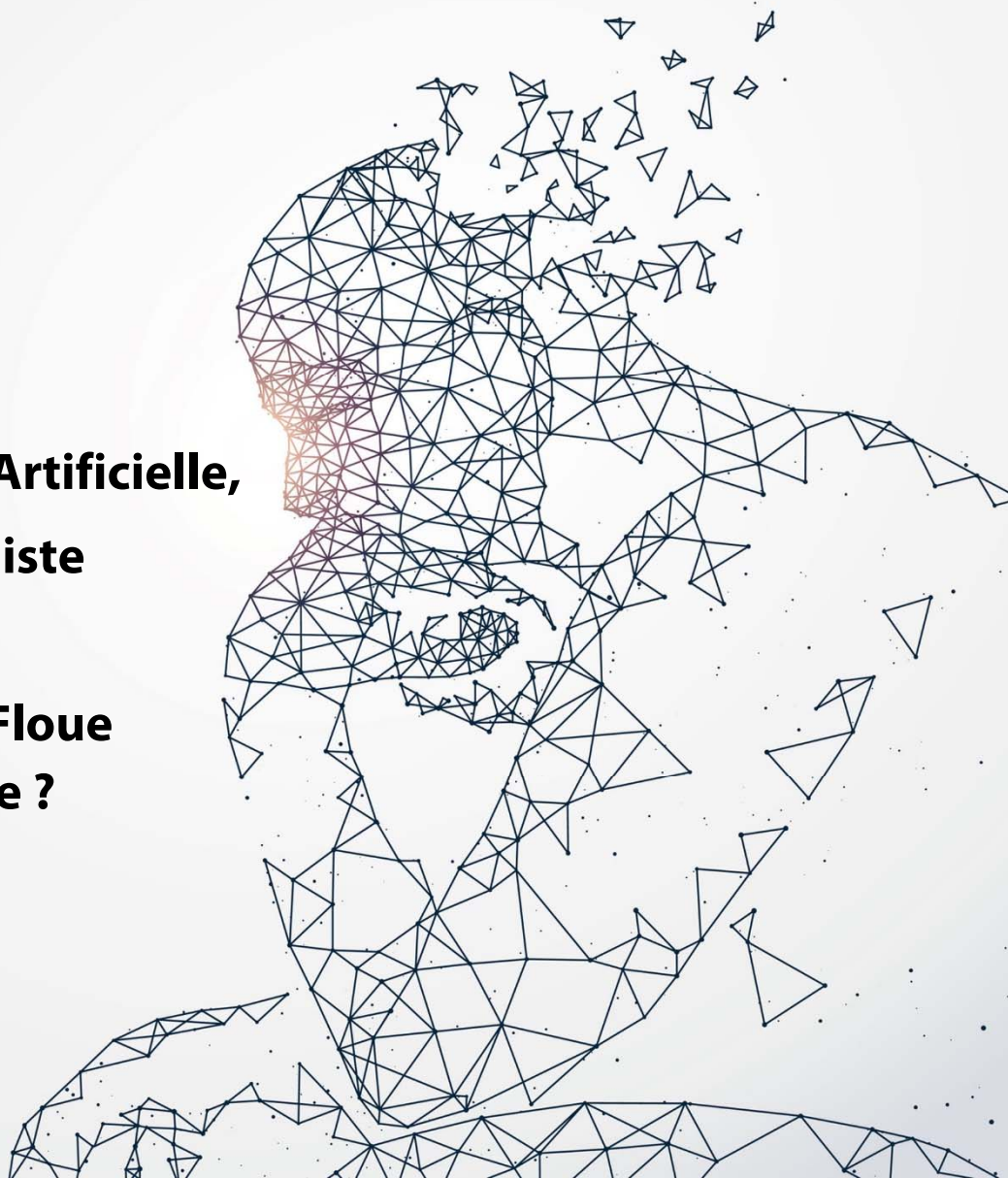


ESSAI

**Votre Intelligence Artificielle,
Connexionniste
ou
Cognitiviste Floue
Augmentée ?**



Auteur : Prof. Zyed ZALILA

Intellitech : Président – Directeur Général, Directeur R&D

Sorbonne Universités | UTC : Professeur de Mathématiques du Flou et d'Intelligence Artificielle

Première publication : 01/2017

Révision : v1.3 – 09/2017

INTELLITECH – 14 rue du Fonds Pernant – Technopolis III – 60200 Compiègne, FRANCE

Tel: +33 (0)3 44 23 48 90 – Web : www.intellitech.ai – www.xtractis.ai

SARL au capital de 206 400 Euros – R.C.S. Compiègne B 419 510 128 – SIRET 419 510 128 00020 – Code APE 731Z

Avertissement

L'intégralité du présent document est protégée par les droits d'auteur. Les droits de reproduction sont réservés.

Toute citation de quelque partie du document devra obligatoirement comporter la référence suivante :

Zalila, Z. (2017) *Votre Intelligence Artificielle, Connexionniste ou Cognitiviste Floue Augmentée ?* Essai, v1.3, Intellitech, Compiègne, septembre, 27 p, <https://xtractis.ai/fr/essai-ia-connexionniste-ou-cognitiviste-floue-augmentee/>

Résumé

L'Intelligence Artificielle (IA) a plus de 60 ans et ses multiples applications opérationnelles commencent à révolutionner la société en questionnant la répartition future des fonctions et des métiers : dans un avenir proche, quels postes seront dédiés aux robots intelligents et quels postes seront encore l'apanage des hommes ? Dans le cadre de cet essai, nous présentons les deux approches concurrentes de l'IA en exhibant leurs limites épistémologiques et pratiques respectives : d'une part, l'IA Cognitiviste, approche logique et psychologique, qui a permis le développement des Systèmes Experts à base de règles décisionnelles ; d'autre part, l'IA Connexionniste, approche biomimétique, qui a produit le concept de Réseaux de Neurones, promu depuis les années 90 sous l'expression *Deep Learning*. Pour tenter de pallier les limites de ces deux approches, nous proposons une approche hybride, que nous nommons « Intelligence Artificielle Floue Augmentée ».

Sommaire

I. Vous avez dit IA ?	4
II. L'IA Cognitiviste Bivalente et ses (nombreuses) limites.....	5
La Logique Bivalente ? Plutôt simpliste.	5
Acquérir manuellement les connaissances expertes ? N'y pensez plus.	6
Convoquer Descartes pour résoudre les problèmes complexes ? Un mythe.	7
Déployer la Méthode Scientifique Expérimentale ? Intéressant, mais peut mieux faire.	8
Votre modèle est précis ? Concentrez-vous plutôt sur sa robustesse.	9
Vous avez tout à fait le droit d'assumer que vous ne savez pas ! Le savez-vous ?	10
Opter pour l'IA Cognitiviste Floue ? Très efficace, mais tout compte fait peut être améliorée.	11
III. L'IA Connexionniste : limites et atouts	12
IV. L'IA Cognitiviste Floue Augmentée, ou le meilleur des deux mondes.....	13
Du paradoxe de l'induction cognitive automatique.....	15
V. L'IA Floue Augmentée pour une Médecine Prédicative Personnalisée	15
Exemple 1	15
Exemple 2.....	16
VI. Conclusions	17
Épilogue.....	20
VII. Références	20

Biographie



Prof. Zyed ZALILA, 53 ans, est PDG-Fondateur de la société de R&D Intellitech [intelligent technologies] et son directeur R&D. Ingénieur en mathématiques appliquées et en intelligence artificielle de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), Docteur en mathématiques du flou de l'UTC, Habilité à Diriger des Recherches, Prof. Zalila enseigne depuis 1993 la théorie du flou et ses applications dans cette même université.

Dès 1990, il met en application ses recherches en flou pour inventer le concept de « chauffeur virtuel » et de « salon roulant » : ses premiers systèmes intelligents de conduite automatique (ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*) sont opérationnels sur route ouverte, en partenariat avec RENAULT.

En 1998, Prof. Zyed Zalila crée Intellitech, société spécialisée dans la conception de logiciels décisionnels intégrant les dernières avancées de l'Intelligence Artificielle (théorie du flou, théorie de l'apprentissage automatique). Dès 2003, il opère un pivot dans la stratégie d'Intellitech : proposer une solution professionnelle universelle de Découverte Automatique de Systèmes Décisionnels Prédicatifs à partir de Big / Smart Data, ne nécessitant aucune programmation informatique et présentant une meilleure fiabilité prédictive par rapport aux techniques Open Source.

Prof. Zalila a dirigé de nombreuses recherches en mathématiques du flou et leurs applications. Il est co-inventeur de 8 ADAS flous brevetés dans 15 pays, et en 2000 d'xpark!® le premier système mondial de stationnement automatique, opérationnel dans les situations les plus contraintes. Depuis 2002, il est le co-inventeur des différentes générations du robot intelligent xtractis® de Modélisation Prédicative Robuste de processus complexes par Intelligence Artificielle Floue Augmentée, dont les droits sont protégés au niveau mondial.

Prix et Reconnaissance

Depuis 2004, Intellitech est membre du Comité Richelieu, l'association française des PME de Haute Technologie. Depuis 2005, elle est inscrite par le Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale placé auprès du Premier Ministre sur la liste des entreprises appartenant aux secteurs stratégiques pour la préservation et la promotion des intérêts stratégiques nationaux.

En 2005, Intellitech a reçu le *Prix de la Presse Économique de Picardie* dans la catégorie *Entreprise Innovante de l'année* récompensant ses efforts d'innovation de très haut niveau, matérialisés notamment par le dispositif xpark!®, solution avant-gardiste de stationnement automatique de véhicules, efficace même dans les situations les plus difficiles.

Prof. Zyed Zalila a reçu le *Prix du Chercheur de l'année 2006* dans le cadre des trophées *Les Hommes de l'Année* décernés par le *Nouvel Économiste*, pour ses travaux sur xpark!® et sur xtractis®.

En 2008, le cabinet international Frost & Sullivan a décerné à xpark!® le prix de la *Meilleure Innovation Produit dans les systèmes de sécurité automobile*.

En 2012, Intellitech a reçu le *Prix Coup de Cœur du jury* dans le cadre du *Palmarès Deloitte Technology Fast 50 Nord de France* pour son robot xtractis®.

xtractis® a remporté plusieurs benchmarks nationaux et internationaux en défiant les approches scientifiques dominantes : Régression Polynomiale, Régression Logistique, PLS (Partial Least Squares), Réseaux de Neurones/ Deep Learning, Réseaux Bayésiens, Arbres de décision CART, Random Forests, Boosted Trees, SVM (Support Vector Machines).

Intellitech s'est distinguée lors des *Palmarès Deloitte Technology Fast 50 Nord de France 2011 et 2012*, récompensant les 50 entreprises technologiques indépendantes à plus forte croissance en Haute-Normandie, Picardie et Nord-Pas de Calais.

Intellitech a aussi été lauréate des *Palmarès Deloitte Technology Fast 500 EMEA 2011 et 2012*, récompensant les 500 entreprises technologiques indépendantes à plus forte croissance dans la région Europe/Moyen-Orient/Afrique.

I. Vous avez dit IA ?

Considéré comme le père de l'Intelligence Artificielle (IA), le mathématicien britannique Alan Turing imagine dès 1936 une machine programmable capable de réaliser rapidement toutes sortes de calculs [Turing 1936]¹. Il est convaincu qu'un automate peut se montrer aussi intelligent que l'Homme s'il est capable de reproduire son activité mentale.

Bénéficiant des percées en cryptographie réalisées par le mathématicien polonais Marian Rejewski dans les années 30, Alan Turing met en pratique son intuition en concevant, dès 1941 pour les services du décodage anglais, *the Bombe* un automate électromécanique capable de découvrir quotidiennement en quelques heures la clef spécifique pour décrypter les messages codés, échangés entre l'état-major allemand et l'armée nazie². Turing avait très rapidement compris qu'une telle tâche était humainement insurmontable³ : il proposa donc de développer une analyse logique et automatisée de l'espace des possibles et des probables, basée sur les imprudences des chiffreurs allemands et sur la connaissance détenue par les polonais sur le fonctionnement interne de la machine. Après-guerre, il poursuit ses réflexions philosophiques et suggère qu'une machine puisse revendiquer le qualificatif d'« intelligente », du moment qu'elle est capable de se faire passer pour une intelligence humaine [Turing 1950]⁴.

Explorant le paradigme de Turing de machines pensantes, Marvin Minsky, spécialiste de sciences cognitives, invente le SNARC⁵, premier simulateur de réseau neuronal auto-apprenant [Minsky 1952, 1954]. En août 1956, il organise avec son confrère mathématicien John McCarthy, Claude Shannon, père de la théorie de l'information et Nathaniel Rochester, directeur scientifique d'IBM une conférence au Dartmouth College (Hanover, New Hampshire, USA). Leur

ambition est de lancer une discipline nouvelle de recherche, l'« Intelligence Artificielle », dont l'objectif serait le développement de nouveaux concepts, techniques et méthodes permettant la création d'un « cerveau artificiel » grâce notamment à la disponibilité des gros ordinateurs de cryptanalyse développés durant la 2^e guerre mondiale [Wikipédia 1].

Suite à cette conférence séminale, qui a regroupé plusieurs chercheurs de disciplines diverses, deux approches concurrentes émergent : suivant le paradigme d'une pensée rationnelle calculatoire défendue par Leibniz et Turing, les logiciens et psychologues cognitivistes, sous la houlette de McCarthy, prétendent que la pensée de l'Homme se fonderait sur sa capacité à manipuler des symboles par application de règles formelles ; aussi, une machine intelligente se devait-elle de savoir calculer à l'aide de symboles. Cette branche a été nommée « IA Symbolique » ou « IA Cognitiviste » ou « IA Computationnaliste » dont le philosophe de l'esprit Jerry Fodor fut l'un de ses fervents défenseurs [Fodor 1975]. Parallèlement, les neurobiologistes, neurophysiologistes et neuropsychologues, menés par Minsky et Rosenblatt, soutiennent que l'intelligence de l'Homme émanerait plutôt de la structure neuronale de son cerveau ; de fait, une machine intelligente se devait d'intégrer un modèle artificiel du cerveau. Cette branche biomimétique reçut le nom d'« IA Sub-Symbolique » ou « IA Connexionniste ».

Dans le cadre de cet essai, nous exposerons les limites de l'IA Cognitiviste et de l'IA Connexionniste et présenterons une approche hybride, que nous nommons « Intelligence Artificielle Floue Augmentée », pour tenter de pallier les limites des deux approches susvisées.

¹ Son concept mathématique de machine calculante universelle était censé représenter une personne virtuelle exécutant une procédure bien définie, sous forme d'instructions (table de transitions). La machine était dotée d'une mémoire infinie (ruban composé d'une infinité de cases contiguës) et d'une unité de lecture et d'écriture ; elle était programmable et reprogrammable. De nos jours, les machines de Turing sont appelées des programmes informatiques ou par extension des ordinateurs.

² De 1939 à 1941, dans le manoir victorien de *Bletchley Park*, entre Oxford et Cambridge, abritant secrètement les services de décodage du renseignement anglais, Turing rédige les spécifications de *the Bombe* et l'améliore grâce à ses confrères Gordon Welchman et Richard Pendered : une machine capable de déterminer chaque jour, parmi les $159 \cdot 10^{18}$ clés possibles du système de codage nazi *Enigma* la clef qui donnera accès aux messages entre l'état-major allemand et ses sous-

marins croisant dans l'Atlantique Nord. Les historiens estiment que le décodage du code *Enigma* a abrégé la 2^e guerre mondiale d'au moins deux ans et a ainsi permis de sauver plus de 14 millions de vies.

³ Si une équipe de 10 000 hommes pouvait vérifier 10 000 clefs par minute, 24h/24, 7jours/7, 365 jours/an, il lui aurait fallu une année pour tester 5,256 milliards de clefs différentes et donc plus de 30 milliards d'années pour tester l'intégralité des combinaisons possibles dans le cadre d'une recherche exhaustive !

⁴ Lors du test *Imitation Game* imaginé par Turing, des juges discutent à distance avec des interlocuteurs dont ils ne connaissent pas la nature (automate ou humain). Si, au bout de cinq minutes de conversation, l'automate réussit à se faire passer pour un humain auprès d'au moins 30 % des juges, alors le test est réussi et l'automate est qualifié d'« intelligent ».

⁵ SNARC = *Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator*

II. L'IA Cognitiviste Bivalente et ses (nombreuses) limites

La logique et la psychologie cognitive postulant que l'Homme raisonnait grâce à l'inférence de règles de décision⁶, les chercheurs en IA Cognitiviste ont développé des systèmes artificiels prenant des décisions par manipulation de symboles : à partir d'une collection de règles « Si... Alors » supposées vraies, un moteur d'inférence permettait d'inférer une décision pour des faits constatés sur une situation particulière. L'objectif étant de modéliser les connaissances d'un expert métier, afin de pouvoir l'utiliser à tout moment et en tout lieu, ils ont rapidement acquis le nom de « Systèmes Experts ».

La Logique Bivalente ? Plutôt simpliste...

Le premier système expert MYCIN développé en 1972 a porté sur le diagnostic médical de pathologies du sang [Shortliffe & Buchanan 1975]. Malgré un benchmark remporté contre des médecins spécialisés en maladies infectieuses, les limites d'une telle approche ont vite apparues. En effet, les paradigmes mis en œuvre dans un Système-Expert sont ceux hérités de la Logique bivalente d'Aristote⁷ : son axiome fondateur précise que le monde est régi par deux états mutuellement exclusifs, le « Vrai » et le « Faux ». Il est ainsi impossible d'être à la fois « Vrai » et « Faux » (Principe de Non-Contradiction), tout comme il est impossible d'être dans un troisième état autre que « Vrai » ou « Faux » (Principe du Tiers-Exclu). Si de tels théorèmes sont précieux pour les démonstrations mathématiques, ils s'avèrent très peu applicables dans le monde réel. Le médecin ne pouvait faire appel à des règles de décision bivalentes pour modéliser son expertise : si l'une de ses règles de diagnostic était presque toujours vraie, cette autre règle était suffisamment vraie, mais pas toujours vraie. Shortliffe et Buchanan ont alors été obligés d'introduire des coefficients de vraisemblance ou de certitude pour pondérer la véracité des déductions réalisées à partir de chacune des règles binaires du Système Expert. Outre les incohérences logiques induites par de tels coefficients de vraisemblance⁸, nul expert n'était capable de

définir la valeur de certitude de chacune des règles qu'il utilisait. De fait, le Système Expert développait un mécanisme de raisonnement qui s'écartait, tant en termes de similitude qu'en termes de résultat, du mécanisme cognitif développé par l'Expert qu'il était censé modéliser.

Il a fallu attendre le début du 20^e siècle, et le développement de la mécanique quantique, pour que certains penseurs osent remettre en cause l'axiome simplificateur imposé par Aristote et donc le raisonnement binaire de la logique classique. Le logicien polonais Jan Lukasiewicz a ainsi proposé dès 1920 une logique ternaire acceptant en sus du « Vrai » et du « Faux », un troisième état : le « Possible » ou l'« Incertain » [Lukasiewicz 1920-1939a, 1920-1939b]. Toutes les mathématiques allaient s'en trouver chamboulées puisqu'elles perdaient *de facto* les propriétés algébriques fortes induites par l'axiome de bivalence. Il alla même jusqu'à proposer une logique acceptant une infinité de nuances de vérité : sa logique *aleph* est ainsi la première logique infinie non-dénombrable-valente, c'est-à-dire une logique acceptant une infinité non-dénombrable de nuances de vérité.

Au début des années 60, obnubilé par le pilotage de systèmes complexes, l'automaticien américano-azéri Lotfi Zadeh admettait qu'il lui était très difficile de modéliser un système complexe grâce à des équations analytiques non-linéaires et encore moins possible d'inverser analytiquement un tel modèle pour construire la loi de commande du système complexe. Épris de la toute jeune IA Cognitiviste, il finit par trouver une solution opérationnelle en déplaçant le problème d'automatique : au lieu de modéliser le processus complexe et de se retrouver en échec lors de l'inversion du modèle, il décide de modéliser la stratégie de résolution développée par un expert humain qui aurait résolu le problème grâce à une approche empirique qualitative, sans l'usage d'équations mathématiques ; ainsi, il tente de modéliser l'expert grâce à un système de règles de décision qu'il aura réussi à lui faire expliciter. La pointe de

⁶ Dès le IV^e siècle av. J.C., Aristote fût le premier philosophe et scientifique à tenter une modélisation du discours humain : son dessein était de proposer un outil ou instrument (*Organon*) permettant d'arbitrer les joutes oratoires organisées entre écoles de philosophie dans l'Agora. Il est l'auteur des concepts essentiels de règle d'inférence et du schéma d'inférence (syllogisme) qui fonderont la Logique. La version formelle et mathématisée de cette discipline deviendra aux 19^e et 20^e siècles le socle de toutes les Mathématiques Modernes. En ce sens, nous estimons qu'Aristote pourrait aussi être considéré comme l'ancêtre fondateur de l'IA Cognitiviste.

⁷ La logique bivalente aristotélicienne est aussi appelée logique binaire du fait que les deux états possibles Faux/Vrai peuvent être codés en système binaire 0/1.

⁸ Les coefficients de certitude ont été proposés *a posteriori* pour tenter de combler une différence notable entre la règle logique proposée par Aristote (une règle utilisée pour réaliser une déduction est toujours

vraie) et la règle nuancée qui serait utilisée par l'Expert (vraisemblablement vraie, presque toujours vraie, fort possiblement vraie, plus ou moins vraie...). Un coefficient de vraisemblance est donc attaché à chaque règle, en supposant que les règles sont indépendantes les unes des autres. Supposons dans le système expert la présence de trois règles redondantes R1 : A→B, R2 : A→B, R3 : A→B dont le coefficient de vraisemblance est 0.3. Avec le mécanisme de combinaison des coefficients de certitude de MYCIN, ces règles concluraient à B avec une vraisemblance de 0.657. Or en Logique, la proposition « (A→B) ou (A→B) ou (A→B) » forme une tautologie, signifiant que la redondance de la même connaissance n'apporte aucune information supplémentaire, et de fait le système se réduirait à R1 pour conclure à B avec une vraisemblance de 0.3. Paradoxalement, la gestion de l'incertitude dans MYCIN fait que si plusieurs règles distinctes sont peu sûres d'elles pour conclure à B, *in fine* elles finiraient par se renforcer l'une l'autre pour conclure à B avec certitude (effet de mimétisme de groupe) !

génie de Zadeh aura été d'abandonner la logique aristotélicienne, retenue par les promoteurs de l'IA Cognitiviste pour les Systèmes Experts, et de la remplacer par la logique *aleph* de Lukasiewicz, qu'il a rebaptisée au passage d'un nom plus marketing : *Fuzzy Logic* ou Logique Floue⁹ [Zadeh 1965, 1968, 1973, 1975]. La gradualité intrinsèque à la logique floue permettait dès lors d'intégrer naturellement l'imprécision, l'incertitude et la subjectivité avec lesquelles l'expert humain percevait le monde réel pour prendre des décisions nuancées. Cependant, cette démarche que nous nommons « **IA Cognitiviste Floue** » reste fortement contrainte, tout comme l'IA Cognitiviste Bivalente, par l'acquisition manuelle des connaissances expertes.

Acquérir manuellement les connaissances expertes ? N'y pensez plus...

Dès le IV^e siècle av. J.C., Socrate préconisait de faire accoucher l'expert de sa connaissance au travers d'un processus d'interrogation interpersonnelle dit de maïeutique. Plusieurs écueils apparaissent rapidement.

De la non-explicitabilité de la connaissance tacite

La psychologie cognitive montre que si les experts néophytes font encore appel à un raisonnement par inférence de règles explicites, les super-experts agrègent au cours de leurs années d'expérience, d'apprentissage et de pratique, toutes les strates de connaissances successivement accumulées. Ainsi, ils ne raisonneraient plus par déclenchement de règles, mais décideraient rapidement en usant d'intuition, d'instinct, de « flair », d'heuristiques, grâce à un mécanisme de décision inconscient [Marewski & Gigerenzer 2012]. Ce type de raisonnement appelé « reconnaissance de formes » associe une décision à une forme abstraite multidimensionnelle reconnue par l'expert. Plus l'expert est capable de reconnaître des formes composées de plusieurs variables ET plus il est capable de reconnaître un nombre important de telles formes ET plus il

est capable d'associer la bonne décision à chacune de ces formes, plus son expertise sera jugée de haut niveau.

Puisque les super-experts font appel à un schéma de raisonnement fondé sur des connaissances tacites ou implicites, qui ne peuvent être explicitées lors d'un processus maïeutique, le principe même de l'IA Cognitiviste se trouve *de facto* mis en échec [Dreyfus 1965]. Pourriez-vous demander à un Grand Maître de Go de vous expliciter sa stratégie de décision ? Non, il se laisse guider dans ses choix de coups par une perception picturale et qualitative des configurations de jeu, difficile à traduire en règles de stratégie formelles. « *Nous, les pros, nous avons du mal à définir comment nous faisons ces choix, sans même parler de l'apprendre à un ordinateur* », dit à *Science* l'Américain Michael Redmond, premier joueur occidental à avoir atteint le 9^e Dan, le rang « divin », le plus haut grade des joueurs professionnels [De Pracontal 2016].

Les experts en évaluation sensorielle font aussi appel à des connaissances tacites¹⁰. Ainsi, le « Nez » en parfumerie saura mesurer avec précision, en aveugle grâce à son odorat, l'intensité de la flaveur jasmin d'un parfum, sans pour autant être capable d'expliquer comment il ou elle a pu prendre sa décision. L'exemple type d'une décision au flair !

De la limitation de l'entendement humain

Grâce à son paradigme de « Rationalité Limitée » de l'agent décideur, Herbert Simon¹¹ démontre que la capacité de l'esprit humain à formuler et résoudre des problèmes complexes est très petite au regard de la taille des problèmes dont la solution est requise [Simon 1957].

Ses travaux ont chamboulé l'économie néo-classique et son agent décideur à la Rationalité Parfaite : jusqu'alors, l'*homo oeconomicus* était supposé prendre rationnellement sa décision, indépendamment des autres agents, en vue de maximiser son utilité ou son profit, à partir d'une information complète et parfaite (sur le passé, le présent et le futur¹²). Bien que simplifiant le développement de modèles mathématiques du Marché Efficient, cet axiome s'avère fallacieux puisque jamais vérifié dans la réalité : pour prendre

⁹ La Théorie du Flou, aussi appelée Mathématiques du Flou, étend toutes les branches des mathématiques classiques en postulant l'existence d'une infinité non-dénombrable de degrés de vérité. Cette théorie rigoureuse est destinée à représenter et à exploiter les données et connaissances entachées d'imprécision, d'incertitude épistémique et/ou de subjectivité. La Logique Floue est la branche qui s'attelle à modéliser les raisonnements humains, approchés et nuancés [Zalila 1993-2016, 2006-2013].

¹⁰ Un analyste sensoriel fait appel à ses sens et à son expérience pour évaluer, de manière la plus objective possible, à l'image d'un instrument de mesure, les descripteurs sensoriels décrivant un produit. Du fait de la variabilité intra et inter inhérente à toute sensation humaine, nous qualifions ces avis experts d'« objectifo-subjectifs ».

¹¹ Économiste, sociologue et psychologue, Herbert Simon est l'un des pères de l'IA et a participé à la conférence fondatrice de Dartmouth

de 1956 : d'après lui, l'ordinateur permet de reproduire et de systématiser la pensée humaine [Partenay 2005]. Avec Newell et Shaw, il développe le *General Problem Solver*, un solveur universel qui s'avèrera toutefois limité à la résolution de problèmes simples [Newell & al 1959]. En 1978, il obtient le Prix de la Banque de Suède en Sciences Économiques en mémoire d'Alfred Nobel (Prix Nobel d'Économie) pour ses travaux sur la Rationalité Limitée.

¹² L'*homo oeconomicus* est censé connaître parfaitement toutes les informations passées et présentes qui lui permettront de décider, ainsi que toutes les conséquences futures de sa décision, **avant** de pouvoir prendre rationnellement sa décision. Dans un tel cas de figure, faudrait-il plutôt « invoquer » un *Deus oeconomicus* (Dieu économique) ?

sa décision, l'agent ne dispose que d'informations incomplètes et incertaines, et bien souvent il agit de manière émotive et subjective, en fonction du contexte du moment, loin de toute optimisation de son profit ou de son utilité [Kuhnen & Knutson, 2005] ; d'où un modèle mathématique théorique développé *ab initio* à partir d'hypothèses comportementales erronées, décrivant certes une économie pure et parfaite, mais incapable de décrire et prédire la complexité du comportement réel du Marché¹³ [von Mises 1949].

Plusieurs recherches en psychologie cognitive expérimentale ont par ailleurs montré la limite de l'Homme à traiter de manière consciente un grand nombre d'informations lors d'une prise de décision : de 1 à 3 variables en simultané pour les personnes normales, jusqu'à 7 à 9 variables en simultané pour les plus génies d'entre nous [Miller 1956].

Ainsi, nous considérons qu'un décideur à rationalité limitée est un décideur en environnement flou : il est amené à prendre une décision à partir d'un nombre limité d'informations et de connaissances imprécises, incertaines et subjectives, tout en usant de connaissances décisionnelles souvent mal définies (heuristiques, savoir-faire, règles floues) [Simon 1955]. D'ailleurs, Simon introduit même le concept de *satisficing solution*¹⁴ pour exprimer le fait que l'agent ne va pas rechercher coûte que coûte la solution optimale si la découverte de celle-ci lui coûterait cher ; très souvent, il se contentera d'une solution suffisamment satisfaisante, c'est-à-dire suffisamment proche de l'optimum. C'est la définition d'une solution floue optimale, découverte grâce à une légère violation d'une ou plusieurs contraintes¹⁵.

Du rejet des Systèmes pas si Experts que cela

Les limitations susvisées de l'entendement humain mettent définitivement échec et mat l'approche classique d'acquisition des connaissances, telle que prônée par l'IA Cognitiviste : limitation de l'Expert à conceptualiser ses connaissances, soit par ce qu'elles sont complexes et nécessiteraient un grand nombre de variables, soit parce

qu'elles sont implicites et donc non exprimables d'une part ; limitation du Psychologue Cognitiviste et de l'Ingénieur Cognitiviste qui tentent de modéliser la connaissance de l'Expert tout en étant dépassés par le grand nombre de variables en jeu, ou acculés par l'impossibilité de l'Expert d'exprimer ses connaissances. N'oublions pas un autre écueil insidieux : la maintenance du savoir. Le processus d'acquisition de l'expertise étant souvent long, plusieurs années peuvent se passer avant de finaliser le système décisionnel. Mais entre-temps, l'expert aura pu faire évoluer ses connaissances et les règles précédemment codées nécessiteraient alors une mise à jour, retardant d'autant la disponibilité du Système Expert mis à jour !

Conséquemment, les connaissances expertes recueillies et modélisées dans le Système Expert seraient au pire, fausses, incohérentes, biaisées, périmées et dans le meilleur des cas sous-optimales. Toutes ces raisons expliquent les nombreux échecs subis par les Systèmes Experts et donc leur rejet par ceux qui pensaient que ce nouveau paradigme d'IA allait rapidement révolutionner le monde.

Convoquer Descartes pour résoudre les problèmes complexes ? Un mythe...

Dans son *Discours de la Méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*, le philosophe et mathématicien français René Descartes proposait une approche systématique en vue de la résolution de problèmes complexes en sciences [Descartes 1637]. Il nous suggérait de décomposer le problème complexe en une somme de sous-problèmes simples¹⁶ ; il suffirait alors de combiner les solutions élémentaires aux sous-problèmes pour trouver une solution au problème complexe originel. Bien que cette approche réductionniste physicaliste¹⁷ soit jusqu'à nos jours promue dans toutes les formations scientifiques et universitaires, elle nous semble fort limitée, pour ne pas dire erronée. En effet, dans un système complexe, il faut non seulement considérer toutes les parties, mais en plus tenir compte de toutes les interactions pouvant apparaître entre les parties. Ainsi, en découpant, qui plus est subjectivement, le système originel en sous-systèmes, on casserait inéluctablement ces interactions qui

¹³ À partir de l'axiome de Rationalité Parfaite, l'économie néo-classique infère le modèle mathématique de l'équilibre général. Le théorème de Sonnenschein-Mantel-Debreu rend inutilisable ce modèle en énonçant que l'équilibre général ne peut être stable qu'au prix d'hypothèses trop restrictives [Wikipédia 2].

¹⁴ Combinaison anglaise de *satisfying* (satisfaisant) et de *sufficing* (suffisant).

¹⁵ Des solutions floues optimales sont bien souvent les seules solutions possibles à un problème d'optimisation multi-objectif fortement contraint. Si toutes les requêtes du problème d'optimisation étaient validées, sauf pour une seule d'entre elles même de très peu, alors le

problème n'admettrait aucune solution optimale dans une logique bivalente aristotélicienne. Or, dans le monde réel, un industriel n'arrêterait nullement le fonctionnement de son usine si une telle solution parfaite n'existait pas ; bien au contraire, il serait heureux de découvrir une nouvelle formulation de son produit, très proche de la solution optimale, qui satisferait l'ensemble de ses requêtes, par exemple, avec un degré d'au moins 0.98 (c'est-à-dire en acceptant une infime violation d'une des requêtes).

¹⁶ Selon le deuxième précepte de Descartes.

¹⁷ Le physicalisme soutient que les choses peuvent être expliquées à partir de la compréhension de leurs parties constituantes.

pourraient s'avérer aussi importantes que les composantes mêmes.

En outre, un système complexe est bien souvent régi par un grand nombre de signaux faibles : une variable dont l'influence individuelle est limitée, mais dont les synergies avec d'autres signaux faibles ou d'autres signaux forts permettraient d'expliquer le comportement du système. Ceci nous interdirait *de facto* l'approche de modélisation incrémentale défendue par Descartes¹⁸, consistant à se focaliser exclusivement sur les quelques variables les plus influentes.

Lorsqu'on analyse la démarche intellectuelle mobilisée en IA Cognitiviste pour la conception de Systèmes Experts, il est navrant de constater que l'approche cartésienne est érigée en dogme. Du fait de la limitation de l'entendement humain, aucun expert ne saurait appréhender plus de quelques variables en simultané pour exprimer sa stratégie de décision [Hayes 1962] ; en conséquence, chaque règle de décision comporterait au plus 2 à 3 prémisses¹⁹. Pire, le paradigme d'arbre de décision, souvent mobilisé en IA pour modéliser une stratégie de décision de classification, s'impose comme l'expression ultime de l'approche cartésienne. Une stratégie mettant en jeu 10 variables se résumerait à tester séquentiellement, de manière binaire, et dans un ordre déterminé subjectivement par le concepteur, chacune des variables, une à la fois !

De même, comme nous l'avons vu précédemment, l'économie néo-classique imagine un Marché composé d'agents économiques tous identiques et prenant des décisions sans aucune interaction entre eux. Une vision cartésienne et simplificatrice du Marché, mais totalement fautive.

Descartes aurait-il ainsi confondu le Complexe avec le Compliqué ? Si le Compliqué est décomposable en la somme de ses parties élémentaires et peut être traité séparément et séquentiellement, le Complexe forme un tout indissociable et exige un raisonnement holistique pour tenter de l'appréhender²⁰. Ainsi, si 10 variables sont en jeu dans un Processus / Phénomène (PP) Complexe (PPC) à étudier, il faudrait être en mesure de raisonner en mobilisant les 10

variables en simultané ; ce qui est, comme nous venons de le voir et en l'état de nos avancées scientifiques actuelles²¹, somme toute impossible pour n'importe quel humain, indépendamment de son Quotient Intellectuel : un « Plafond Cognitif » interdirait à notre raison d'accéder au monde complexe fortement multidimensionnel et interactif dans lequel nous vivons.

Mais, d'aucuns nous rétorqueraient qu'il suffirait de réduire le nombre de variables grâce à une analyse multivariée de données par application du principe de parcimonie²² si cher à la science. Nous soutenons, au contraire, que **la complexité d'un PP est intrinsèque au PP et de fait ne peut être réduite, ni simplifiée** : ainsi, il ne peut exister de modèle simple et performant pour un PPC ; dans le cas contraire, cela signifierait que le PP étudié n'était pas complexe, mais simple. Conséquemment, l'objectif est de déterminer *a posteriori* le niveau de complexité du PPC étudié en procédant d'une approche holistique, sans devoir éliminer *a priori* et subjectivement des variables qui pourraient être importantes au travers de leurs interdépendances ou interactions avec d'autres variables. Nous serions donc partisans d'une extension du principe des Shadoks : « **Pourquoi faire simple et faux, quand on peut faire complexe et juste ?** ».

Déployer la Méthode Scientifique Expérimentale ? Intéressant, mais peut mieux faire...

La méthode scientifique expérimentale a été originellement proposée par Alhacen Ibn al-Haytham, mathématicien, philosophe et physicien arabe de la fin du X^e siècle pour développer ses travaux sur l'Optique géométrique et physiologique : il fût l'un des premiers physiciens à faire appel aux mathématiques pour expliquer le Réel. Ses travaux permirent au moine Franciscain et savant Roger Bacon de théoriser en 1267, dans *De Scientia experimentalis*, le raisonnement scientifique expérimental ; par là-même, Roger Bacon ouvrit la voie au philosophe Francis Bacon pour développer au XVII^e siècle une théorie empirique de la connaissance et les fondements de la science moderne [Hackett 1996]. Roger et Francis Bacon promurent tous deux

perception multidimensionnelle maximale et des capacités intellectuelles illimitées, telle Lucy dans le film de science-fiction éponyme de Luc Besson (2014). Par contre, le fonctionnement de tous les neurones nécessiterait une énorme quantité d'énergie indisponible : après avoir consommé tous les glucides présents dans le corps, le cerveau entraînerait la décomposition des graisses, puis des muscles pour trouver les glucides dont il aurait besoin afin d'alimenter tous les neurones en simultané et ceci resterait insuffisant ! En fonctionnement normal, le cerveau humain utilise déjà environ 20% de la consommation énergétique journalière dont a besoin le corps.

²² Aussi appelé « principe de simplicité » ou « principe d'économie », il pourrait se traduire par : « Pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple ? » [Wikipédia 3].

¹⁸ Selon le troisième précepte de Descartes.

¹⁹ A, B sont les deux prémisses de la règle (A et B)→C.

²⁰ Du grec ὅλος *holos*, signifiant « tout », « entier ». Les Anglo-Saxons parlent de *holistic processing/reasoning* ou *configural thinking*. L'holisme met l'accent sur l'importance d'un tout comme étant une chose qui va au-delà de la somme des parties, où il y a lieu de retenir l'importance de l'interdépendance de celles-ci. La pensée taoïste est intrinsèquement holistique.

²¹ Si dans un avenir proche, nous serions capables de développer une drogue permettant d'interconnecter ultra-massivement nos 100 milliards de neurones (statistiquement un neurone est connecté à seulement 10 000 neurones voisins) et de pouvoir tous les mobiliser en simultané, l'Homme pourrait sans nul doute atteindre un niveau de

le raisonnement par induction en sciences : à partir de mesures expérimentales et d'observations réalisées, grâce à des instruments adaptés, sur le phénomène étudié, le scientifique faisait appel à ses intuitions personnelles (en sus d'illuminations mystiques selon Roger Bacon) pour développer un modèle ou loi mathématique M du phénomène qui confirmait les observations réalisées. Dans un second temps, de nouvelles expériences étaient menées pour confirmer les prédictions réalisées par déduction à partir du modèle M supposé vrai. Si certaines de ces nouvelles observations venaient à infirmer les prédictions de M, le scientifique se devait d'amender M en un modèle M' pour qu'il se conforma aussi bien aux anciennes expériences confirmant M, qu'aux nouvelles qui le réfutaient. Les modèles théoriques imaginés par le scientifique et les observations réalisées sur le phénomène réel devaient se conforter mutuellement : nul modèle scientifique ne devait être accepté s'il était invalidé par des observations expérimentales²³.

Toutefois, le modèle M est créé par le scientifique avec toutes les limites cognitives inhérentes à son humanité. Par conséquent, nous sommes en droit de questionner la véracité de tels modèles, notamment lorsque les observations ne confirment pas toujours les modèles supposés vrais. Les Sciences Économiques devraient-elles encore porter le nom de « Science » lorsque très peu de modèles théoriques posés *ab initio* par des scientifiques, même nobélisés, sont confirmés par les expériences réelles ? Devons-nous nous contenter de modèles simplifiés déformant la réalité, postulés par des scientifiques pour décrire un PPC, ou devrions-nous tenter de dépasser notre limite cognitive à l'aide d'un robot intelligent déployant une méthode inductive automatique pour découvrir le comportement le plus fidèle du PPC, sans qu'il ne soit limité dans sa capacité à appréhender un monde réel fortement multidimensionnel et en interactions ?

Votre modèle est précis ? Concentrez-vous plutôt sur sa robustesse...

Un modèle scientifique ou un système décisionnel est censé proposer de bonnes performances aussi bien sur les situations connues que celles inconnues. La **Précision** est la métrique permettant d'estimer la capacité descriptive d'un modèle : elle évalue la performance du modèle à fournir les bonnes valeurs sur les situations déjà connues. La plupart des scientifiques et ingénieurs se contentent souvent de cet

unique estimateur. Mais comment se comporterait un modèle précis sur des situations inconnues ? La **Robustesse** est justement la métrique estimant la capacité prédictive du modèle. La robustesse, ou capacité de généralisation, est un estimateur plus pessimiste que la précision ; donc si le modèle n'est pas précis, il n'aura aucune chance d'être robuste. Par contre, un modèle précis n'est pas nécessairement robuste. C'est d'ailleurs la situation la plus redoutée en modélisation prédictive, celle de l'apprentissage par cœur ou du sur-ajustement (*overfitting*) : le modèle donne l'impression d'être parfait sur les cas connus et dès qu'on lui demande de prédire sur de nouvelles situations, il se trompe. En réalité, et sans le savoir, le modèle aura modélisé le bruit inhérent aux mesures expérimentales, pensant que les données de référence étaient parfaites !

La Figure 2 montre l'exemple d'un système décisionnel en analyse de risque financier réalisé dans le cadre du projet européen Sun & Sup, à destination des responsables d'incubateurs et de fonds d'investissement [Kuhn 2006] : l'objectif est de prédire si une jeune entreprise innovante a des chances de survivre à 3 ans ? Chaque entreprise est décrite par une centaine de variables quantitatives et qualitatives, caractérisant aussi bien les ressources humaines, que le produit, les finances, les alliances, le marketing ou la propriété intellectuelle. Le modèle flou M1 découvert par le robot xtractis® est parfaitement précis (Figure 2a) : sur le graphe « survie réelle / survie prédite », les 150 entreprises sont toutes alignées sur la diagonale (corrélation $R=1.000$, racine de l'erreur quadratique $RMSE^{24}=0.01\%$) ! Cela signifie que le modèle a été capable de décrire parfaitement les dossiers connus. En jetant un œil à sa structure, on constate rapidement qu'aucun scientifique humain n'aurait pu concevoir un tel modèle : il utilise 77 variables prédictives et est composé de 16 règles floues de décision, soit un système de 16 équations non-linéaires ! Si M1 est très précis, sa robustesse estimée par une validation croisée Monte-Carlo de 10 000 cycles à 15% (10 000 x MC15%) est très mauvaise : sur des dossiers inconnus d'entreprise, le modèle se trompe énormément ($R=0.408$, $RMSE=15.73\%$) et ne peut donc être utilisé pour faire des prédictions. Cette situation est pourtant très fréquente en sciences : « Mais pourquoi l'auteur de cette publication de rang A clame-t-il que son modèle explique bien le phénomène étudié, alors que je constate que son modèle ne prédit plus correctement sur les nouvelles expériences que je viens de réaliser ? ». Certainement des situations déjà vécues...

²³ Cette démarche de la science expérimentale pose question en physique théorique, notamment lorsqu'aucun capteur ne permet la mesure du phénomène étudié en l'état actuel des avancées techniques. Ainsi, les ondes gravitationnelles, déformations en déplacement de l'espace-temps consécutives à la collision brutale de deux trous noirs, n'ont pu être détectées qu'en septembre 2015 par une équipe

internationale de l'observatoire Ligo du California Institute of Technology (USA), soit 100 ans après qu'Albert Einstein les eut prédites dans sa théorie de la relativité générale [Thorne & al 2016].

²⁴ $RMSE = \text{Root Mean Square Error}$ (Racine de la moyenne des carrés d'erreurs)

Le modèle flou M2 xtractis[®] est un peu moins précis (R=0.970, RMSE=3.94%), mais sa robustesse 10 000 x MC15% étant bien meilleure (R=0.849, RMSE=8.61%), il serait capable de prédire la survie de nouveaux dossiers d'entreprise avec une erreur bornée (Figure 2b).

Si une telle métrique semble tellement importante, pourquoi ne calculerions-nous pas systématiquement la robustesse des modèles que nous créerions ? À cela, Nous pourrions évoquer trois raisons possibles :

1. L'Ingénieur ou le Scientifique n'a pas appris l'existence d'une telle métrique. Des failles dans la formation.
2. Il ne souhaite pas calculer la métrique de peur de devoir jeter son modèle si sa robustesse s'avérait faible. Malhonnêteté scientifique.
3. Il jette l'éponge principalement à cause de la lourdeur du processus mis en jeu pour l'estimation de la robustesse. Une aide ne serait pas de trop.

Supposons qu'un Scientifique développe une stratégie cognitive S qui lui est propre pour concevoir par la démarche inductive expérimentale un modèle M conforme aux observations O déjà réalisées. S'il voulait évaluer la robustesse de son modèle M, c'est-à-dire sa capacité prédictive, il lui faudrait déployer le processus suivant de Validation Croisée Monte-Carlo à x% :

Il partitionne au hasard l'ensemble O en deux classes : un ensemble de validation V_i contenant x% des observations et un ensemble d'apprentissage A_i contenant (100-x)% des observations. Puis, il applique sa stratégie cognitive S pour concevoir un nouveau modèle M_i conforme aux observations A_i . M_i est bien un modèle différent de M puisqu'il a été développé à partir d'un ensemble différent d'observations ; mais tout de même nous pouvons considérer M_i comme un « cousin germain » de M, puisqu'il a été développé à partir de la même stratégie S. Il ne reste plus qu'à demander à M_i de prédire sur les observations V_i qui lui sont totalement inconnues. On obtient V_i prédictions sur situations inconnues. Et on itère ce processus N fois. Petit à petit, le nuage des prédictions va grossir et sa corrélation Réel/Prédit, ainsi que sa RMSE vont finir par se stabiliser. Un humain serait-il capable de développer scrupuleusement N fois la même stratégie cognitive S sur N ensembles d'apprentissage distincts ? Serait-il capable de reproduire cela pour N tendant vers 10 000 juste pour estimer la robustesse de son modèle originel ? Les réponses sont bien

évidemment négatives ! Et pourtant, le déploiement de ce processus serait nécessaire pour valider tout nouveau système décisionnel, que cela soit un modèle scientifique ou un Système Expert. Pire, s'il suivait à la lettre les recommandations de Roger Bacon, le Scientifique serait amené à affiner incrémentalement son modèle au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles observations qui viendraient contredire le modèle. D'où le risque fort d'apprentissage par cœur. En réalité, à partir d'un certain niveau d'infirmité, le Scientifique devrait accepter de jeter aux oubliettes son ancien modèle pour en imaginer un nouveau, quitte à ce que ce dernier soit en rupture avec le précédent. La Science a toujours progressé de la sorte par l'adoption de nouveaux paradigmes qui étaient jusqu'alors considérés comme rebelles, blasphématoires et hérétiques ! La représentation géocentrique de Ptolémée²⁵ a ainsi été supplantée par le modèle héliocentrique de Copernic²⁶, lui-même corrigé par le système elliptique de Kepler²⁷, dont les lois expérimentales ont été prouvées théoriquement par la théorie de la gravitation universelle de Newton²⁸, elle-même englobée et supplantée par la relativité générale d'Einstein, qui est à son tour remise en cause par la théorie des cordes depuis la fin du XX^e siècle.

En conclusion, de par la limitation de notre entendement, nous ne pouvons-nous assurer de la robustesse des systèmes décisionnels que nous créons *ab initio*, que cela soit à partir d'une démarche inductive expérimentale ou à partir de notre expertise passée. Or la robustesse est une condition nécessaire pour nous assurer de la fiabilité future d'un modèle prédictif [Zalila & al 2006a, 2007, 2013]. D'où la nécessité de faire appel à un automate pour nous épauler dans la réalisation de cette tâche.

Vous avez tout à fait le droit d'assumer que vous ne savez pas ! Le savez-vous ?

La logique aristotélicienne nous conforte dans nos certitudes : elle nous impose d'être sûr que c'est vrai ou d'être sûr que c'est faux, aucune autre issue n'étant possible. Pourtant, bien de situations de la vie réelle nous laissent emplies de possibilités et d'incertitudes. Une incertitude non pas stochastique, qui serait liée à un phénomène aléatoire, mais plutôt épistémique, dénonçant une incomplétude d'informations. Si le premier type d'incertitude est directement géré par la théorie des probabilités, le deuxième type est régi par la théorie des possibilités et des nécessités

²⁵ Le géocentrisme est un modèle physique ancien et erroné selon lequel la Terre se trouve immobile, au centre de l'Univers.

²⁶ L'héliocentrisme est une théorie physique qui place le Soleil au centre de l'Univers, ou, suivant les variantes, du seul système solaire. Les planètes suivent des orbites circulaires parfaites autour du Soleil.

²⁷ Kepler propose un modèle héliocentrique dans lequel les planètes suivent des trajectoires elliptiques.

²⁸ Les équations de Newton fournissent une solution exacte dans le cas d'un corps isolé en orbite autour d'un autre, dit problème à 2 corps. Pour le système solaire, elles ne sont qu'une approximation puisqu'elles négligent les interactions réciproques des planètes (problème à N corps).

[Zadeh 1978] [Dubois & Prade 1986] [Zalila 1993], l'un des socles fondamentaux de la Théorie du Flou.

Au début du XX^e siècle, le physicien et mathématicien français Jacques Hadamard avait établi une catégorisation binaire des problèmes mathématiques : les problèmes « bien posés », qui disposent d'une solution unique, et les problèmes « mal posés » pouvant avoir plusieurs solutions différentes équipervalentes ou n'avoir aucune solution [Hadamard 1902].

En procédant de la sorte, nous devrions être autorisés à répondre qu'un problème n'a pas de solutions ou qu'il accepte plusieurs solutions en les exhibant. Par exemple, un processus industriel complexe qui induirait un taux de rebut extrêmement élevé, malgré plusieurs tentatives de maîtrise de la qualité de production, est un problème qui n'aurait actuellement aucune solution. À l'opposé, si plusieurs experts différents réussissent à piloter un processus chimique complexe avec un niveau de qualité suffisant, nous pourrions dire que le problème a plusieurs solutions différentes, quoiqu'équivalentes. Cela nous inviterait à développer autant de Systèmes Experts différents que nous disposerions d'experts de haut niveau. Or, la stratégie en vigueur en IA Cognitiviste est plutôt d'agrèger les connaissances des experts en un unique Système Expert, quitte à ce que certaines connaissances issues d'experts distincts conduisent à de graves incohérences, risque d'autant plus aigu que l'acquisition des connaissances est amenée à s'étaler sur plusieurs années²⁹.

Opter pour l'IA Cognitiviste Floue ? Très efficace, mais tout compte fait peut être améliorée...

Nous venons de voir que l'IA Cognitiviste Floue, communément appelée Logique Floue, comblait les écueils de la logique aristotélicienne, en proposant de nuancer la véridité de propositions ou le degré de possibilité d'occurrence d'un événement lors de la construction de système décisionnel. Le concept de règle floue décisionnelle du type « Si (X est A) et (Y est B) Alors (Z est C) » est central car il définit linguistiquement et implicitement une relation floue non-linéaire reliant la variable Z à prédire aux variables prédictives X et Y utilisées dans la partie prémisse de la règle. Son principal avantage reste son interprétabilité par tout expert métier, même non mathématicien. Ainsi, une règle floue représente un modèle local et une collection de règles

floues permet de définir le modèle global couvrant l'espace de décision. Si une règle floue s'avérait insuffisante pour modéliser correctement une certaine région de l'espace décisionnel, il suffirait de la remplacer par un ensemble de règles plus locales, plus spécifiques car couvrant des grains plus fins. Grâce à ces propriétés de localité et de granularité, un système décisionnel à base de règles floues, encore appelé « Système d'Inférence Floue » ou « Système Expert Flou », est un approximeur universel de fonctions non-linéaires [Kosko 1992] [Wang & Mendel 1992]³⁰. Ceci explique pragmatiquement les nombreux succès remportés par les Systèmes Experts flous depuis la fin des années 80 pour gérer des problèmes complexes, en contrôle-commande, en supervision, en diagnostic [Terano & al 1989] [Japon IA 1989] [Zalila & Lézy 1993, 1995] [Zalila & Coffin 1996] [Zalila & al 1998a, 1998b, 1998c, 1998d, 1998e, 2000, 2004a], tandis que les Systèmes Experts à logique classique bivalente ne cessaient de cumuler des échecs.

Rappelons que la plupart des autofocus utilisent un Système Expert flou pour prendre des photos nettes et de qualité en simulant l'expertise de mise au point d'un photographe professionnel, ou que les machines à laver les plus économes en énergie notées A+, A++... embarquent toutes un Système Expert flou pour régler la quantité de poudre nécessaire, la quantité d'eau, la vitesse de rotation du tambour, la température de l'eau et la durée de lavage, et ce en fonction des estimations floues du degré de salissures du linge, de la quantité de linge et de sa fragilité ! Ou que le premier système opérationnel au monde de stationnement automatique xpark[®] intégrait un grand nombre de systèmes flous, simulant l'expertise d'un chauffeur professionnel et permettant de garer en créneau un monospace avec seulement 30cm à l'avant et 30cm à l'arrière ! [Zalila & Gueydan 2000] [Gueydan & Zalila 2003] [Auto-innovations 2008]. Dans le paragraphe V, nous présenterons brièvement deux applications de Systèmes Experts flous en médecine prédictive personnalisée.

Toutefois, malgré ses nombreux succès, l'IA Cognitiviste Floue traîne avec elle la limitation originelle de l'IA Cognitiviste Bivalente : l'acquisition des connaissances procède selon le processus manuel de la maïeutique, donc se trouve intrinsèquement acculée par les limitations susvisées de l'entendement humain. Les Systèmes Experts flous, même s'ils paraissent performants, n'affichent pas de métriques intensives de robustesse garantissant cette

²⁹ Supposons que deux experts E_1 et E_2 du même métier développent respectivement des stratégies de décision $\{R_{1i}\}$ et $\{R_{2j}\}$ équipervalentes, où les R_{1i} et R_{2j} sont les règles de décision. Si les R_{1i} de E_1 (respectivement R_{2j} de E_2) sont cohérentes entre-elles, il est fort possible que la stratégie de décision $\{R_{1i}, R_{2j}\}_{ij}$ agrégeant l'expertise du groupe d'experts $\{E_1, E_2\}$ ne le soit plus.

³⁰ Si les travaux de Kosko, Wang et Mendel prouvent l'existence théorique d'un système flou permettant d'approcher de la manière la

plus **précise** possible n'importe quelle fonction multidimensionnelle non-linéaire et non-monotone, ils ne donnent aucune indication sur la manière de procéder pour découvrir ce système flou. Par une approche humaine manuelle, il devient alors peu vraisemblable de découvrir systématiquement une telle solution précise, encore moins probable de prouver l'existence d'une solution **robuste** au problème posé et quasiment impossible de découvrir une telle solution robuste si elle existait.

performance affichée. Face à la complexité du processus à appréhender, l'expert humain développe des connaissances tacites et l'Ingénieur Cogniticien ne pouvant appréhender plusieurs variables à la fois pour coder cette connaissance

implicite, se résigne à adopter l'approche cartésienne réductionniste ou la méthode expérimentale manuelle pour concevoir son Système Expert flou.

III. L'IA Connexionniste : limites et atouts

Pourtant, l'IA Connexionniste, branche concurrente de l'IA Cognitiviste, avait très tôt proposé une méthode automatisée pour modéliser un réseau artificiel de neurones [Hebb 1949] [Rosenblatt 1957] [Lettvin & al 1959]. Utilisé principalement pour la classification (traitement d'images) et la perception artificielle (vision automatique, reconnaissance automatique de la parole et de l'écriture), un réseau de neurones est un graphe orienté, composé de nœuds (les « neurones ») connectés à d'autres nœuds par des arcs pondérés et des fonctions d'activation (les « synapses »). Les neurones amont qui sont excités combinent leurs signaux grâce aux coefficients synaptiques et transmettent le signal résultant au neurone aval³¹. L'idée est de renforcer les connexions lorsque le réseau produit une bonne réponse et de les affaiblir lorsque la réponse est mauvaise³². Les premières versions de réseaux neuronaux formels, en particulier le *Perceptron* proposé par Rosenblatt, ont été laminées par Minsky et Papert du fait de leur incapacité à traiter des problèmes non-linéaires et non-convexes [Minsky & Papert 1969]. Pourtant, dès 1965, Ivakhnenko et Lapa proposèrent le *Perceptron Multicouche* pour gommer cette limitation originelle [Ivakhnenko & Lapa 1965]. Werbos, Rumelhart & al complétèrent le concept en y adjoignant l'algorithme de rétro-propagation du gradient de l'erreur [Werbos 1974, 1981-1982] [Rumelhart & al 1986], initialement proposé par Linnainmaa pour ajuster les valeurs des poids synaptiques [Linnainmaa 1970]. La dénomination *Deep Learning*, plus à la mode de nos jours, embrasse exactement ce même paradigme, originellement proposé voici plus de 50 ans ! Schmidhuber présente de manière très exhaustive tous les travaux menés dans ce domaine depuis les origines [Schmidhuber 2015].

Toutefois, nous opposons au paradigme connexionniste plusieurs inconvénients majeurs :

- i. Son principal défaut est sa non-interprétabilité : étant un graphe super-connecté, aucun humain ne serait en mesure de comprendre, ni d'interpréter la solution

modélisée par le réseau de neurones. Le réseau de neurones fournit bien une réponse, mais est incapable de justifier sa réponse. D'ailleurs, les spécialistes des réseaux de neurones ne savent toujours pas comment un tel réseau réussit à trouver une solution au problème posé ! Ceci est une grave limitation, notamment lorsque le système décisionnel doit être audité et homologué par un organisme régulateur, par exemple dans les domaines de la Finance, de la Médecine, des Transports, du Nucléaire, de la Défense ou de la Santé. En fait, à chaque fois que la décision prise par le réseau de neurones, et inattendue, pourrait engendrer des pertes humaines ou des dégâts financiers, humains, industriels ou environnementaux, extrêmement coûteux.

- ii. Le réseau de neurones nécessite un très grand volume de données pour se stabiliser. De fait, plusieurs problèmes ne peuvent être résolus grâce à ce concept, tout simplement par manque de données³³. En outre, plus le volume de données est important, plus il sera nécessaire de déployer une grande capacité de calculs pour découvrir le réseau de neurones solution.
- iii. Le réseau de neurones modélise un système décisionnel au comportement global : dès qu'un paramètre du réseau viendrait à changer, le comportement du réseau changerait. Cela complexifie et allonge le processus pour découvrir un réseau de neurones solution au problème posé.
- iv. L'Ingénieur Connexionniste devra faire des choix *a priori* concernant l'architecture du réseau de neurones : combien de neurones d'entrée, combien de couches cachées, combien de neurones pour chacune des couches cachées, présence ou absence de boucles de rétroaction, quelles fonctions d'activation pour chacun des neurones ? Cette démarche subjective ralentit le travail de conception, n'incite pas l'Ingénieur à tester un grand nombre d'architectures et conduit à

³¹ La somme pondérée des signaux provenant des neurones amont est transformée par une fonction d'activation (à seuil, linéaire, radiale, stochastique) ; le résultat est transmis au neurone aval.

³² Cette méthode est celle de l'« apprentissage supervisé ». Elle suppose l'existence d'une base de données de référence présentant les décisions qu'il faudrait prendre pour chacune des situations de référence.

³³ Le programme *AlphaGo* de *DeepMind* qui a réussi à battre en 2016 un Grand Maître de Go 9^e Dan était composé de deux réseaux de neurones à 13 couches chacun. Il a débuté son apprentissage initial à partir de l'analyse de 30 millions de configurations de jeu ; et pour chacune de ces configurations, il disposait du meilleur coup proposé par un bon joueur. La deuxième étape a consisté à le faire jouer contre lui-même afin qu'il puisse développer son expérience « personnelle » du jeu [De Pracontal 2016].

des solutions souvent biaisées, généralement sous-optimales.

- v. Enfin, le réseau de neurones a la fâcheuse tendance à sur-apprendre à partir des observations réelles qu'on lui soumet. Ainsi, la stratégie de décision qu'il proposera sera bien souvent très précise, mais moins robuste, c'est-à-dire que ses prédictions sur des situations inconnues seront moins fiables. Bien entendu, des techniques dites de régularisation éviteront au réseau de neurones d'être trop complexe en pénalisant les valeurs élevées des paramètres de structure (nombre de neurones, nombre de couches cachées). Comme déjà évoqué précédemment, en vérité, nous ne connaissons quasiment jamais *a priori* la complexité du Processus / Phénomène nouveau que l'on s'apprête à étudier. En appliquant *a priori* et

systématiquement le principe de parcimonie, l'Ingénieur Connexionniste risquerait alors d'obtenir un modèle certes simple, mais faux : **le Complexe ne peut être simplifié !**

Cependant, le réseau de neurones possède deux avantages majeurs. D'une part, il partage avec le système d'inférence à base de règles floues la propriété d'approximateur universel de fonctions non-linéaires [Cybenko 1989] [Hornik 1991]; mais son principal atout reste sa capacité d'auto-apprentissage, c'est-à-dire à découvrir seul les valeurs optimales des poids synaptiques, permettant de minimiser l'erreur de prédiction sur les cas observés. La combinaison de ces deux caractéristiques explique d'ailleurs pourquoi un réseau de neurones a tendance à découvrir des solutions très précises, mais pas toujours robustes !

IV. L'IA Cognitiviste Floue Augmentée, ou le meilleur des deux mondes

Fervent défenseur de la Théorie du Flou et de ses multiples avantages par rapport aux approches standard, j'ai été souvent navré de ne pouvoir toujours prouver l'existence d'un Système Expert Flou Robuste solution qui modéliserait le Processus / Phénomène Complexe (PPC) étudié et encore moins de découvrir si un tel système flou existait. D'où l'idée de faire appel à des algorithmes d'apprentissage comme le ferait un réseau de neurones, c'est-à-dire à des techniques mathématiques d'optimisation issues de la théorie de l'Apprentissage Automatique ou *Machine Learning* [Mitchell 1997].

Des approches hybrides, dites neuro-floues, sont apparues mixant les systèmes flous et les réseaux de neurones [Jang 1993] [Leondes 1998] [Liu & Li 2004]. En 2002, nous décidions d'hybrider la théorie des Relations Floues d'ordre N [Zalila 1993]³⁴ avec le *Machine Learning* pour développer un Robot Flou Apprenant, sans faire appel aux réseaux de neurones afin d'éviter leurs inconvénients susvisés [Zalila 2003]. L'idée directrice était de concevoir un Robot Solveur Universel capable :

1. de mobiliser une famille infinie de stratégies d'apprentissage originales, robustes et rapides ;
2. pour découvrir automatiquement les lois cachées du PPC étudié³⁵, à partir d'un ensemble d'observations réelles faites sur le PPC (processus logique d'Induction³⁶) ;
3. de traduire les Relations Floues d'ordre N découvertes en une collection de règles linguistiques floues interprétables par l'Homme ;
4. d'évaluer systématiquement la stabilité ou robustesse³⁷ des connaissances découvertes, c'est-à-dire la fiabilité des prédictions réalisées, à partir de ces connaissances, sur de nouvelles observations ;
5. de mettre à jour automatiquement ces connaissances dès que le comportement du PPC viendrait à évoluer ;
6. d'utiliser les connaissances robustes pour prédire le futur état du PPC (processus logique de Déduction³⁸) ;
7. d'utiliser les connaissances robustes pour découvrir des valeurs possibles des variables prédictives (variables d'entrée) permettant de satisfaire une requête multi-objectifs définie sur les variables à prédire, tout en

³⁴ La théorie des Relations Floues d'ordre N, proposée dans ma thèse de Doctorat, étend la théorie des ensembles flous à un espace multidimensionnel et à une famille infinie d'opérateurs logiques flous. Elle définit de nouvelles structures algébriques et expose les structures maximales pouvant être atteintes en fonction des opérateurs logiques en jeu. Elle propose une famille infinie de mesures floues généralisées *c*-duales de possibilité et de nécessité, et démontre que ces mesures floues se ramènent à des cas particuliers de composition par ancrage de relations floues (multiplication par fusion).

³⁵ Les lois sont définies par des Relations Floues d'ordre N reliant N-1 prédicteurs à la sortie à prédire. Le robot doit donc réussir à découvrir

des formes floues décisionnelles non-linéaires dans un espace multidimensionnel.

³⁶ Induction : On suppose la prémisse A et la conclusion B. On en induit la relation causale : A→B.

³⁷ L'estimateur de robustesse est aussi appelé « capacité de généralisation » : les connaissances découvertes sont-elles suffisamment générales pour expliquer des cas inconnus autres que les cas d'apprentissage ayant servi à la découverte de ces mêmes connaissances ?

³⁸ Déduction : On suppose la relation causale A→B et la prémisse A. On en déduit la conclusion B.

respectant des contraintes imposées sur les variables prédictives (processus logique d'Abduction³⁹).

Un tel robot permettrait de fournir à l'Ingénieur ou au Scientifique des résultats nouveaux de trois types :

- un ensemble inédit de Systèmes Experts Flous **les plus robustes et les plus compacts possibles**⁴⁰ ;
- les décisions inédites prédites par les Systèmes Experts Flous pour toute nouvelle situation rencontrée ;
- des **prescriptions optimales** inédites qui, si elles étaient placées en entrée des Systèmes Experts Flous, permettraient d'atteindre la requête-objectif désirée⁴¹.

Il est à noter que dans une telle démarche, l'Ingénieur ou le Scientifique n'a plus à assumer d'hypothèses de conception *a priori*. Si ce n'est la définition du sur-ensemble de variables potentiellement prédictives à partir duquel le robot va devoir sélectionner seul les variables prédictives pour construire dans un deuxième temps un ensemble de règles floues décisionnelles. Afin de pouvoir conserver les signaux faibles, le robot est obligé d'aborder le PPC, non plus selon les préceptes cartésiens physicalistes réductionnistes, mais plutôt par une approche holistique systémique.

Le Robot Intelligent xtractis[®], conçu et développé par Intellitech, répond au cahier des charges susvisé : il combine tous les avantages hérités de l'IA Cognitiviste Floue et de l'IA Connexionniste, auxquels il adjoint une évaluation systématique et intensive de la robustesse des systèmes décisionnels flous qu'il crée [Zalila & al 2008, 2008-2013]. En ce sens nous le qualifions d'**IA Floue Augmentée** (IAFA) ou de Robot Découvreur de Connaissances et de Solutions Optimales⁴². Grâce à ce que nous appelons **Exocerveau** ou Orthèse Cognitive, l'Ingénieur et le Scientifique sont ainsi en mesure d'accéder à une perception multidimensionnelle du monde réel. Paradoxalement, notre robot IAFA les aide à

comprendre ce monde complexe et interactif, en réussissant à **explicitier sous formes de règles linguistiques « Si...Alors » les connaissances non-explicitables et tacites qui leur échappaient !** Ainsi, notre Exocerveau est composé d'un super hémisphère droit⁴³ capable de raisonner de manière holistique et d'un super hémisphère gauche⁴⁴ capable de traduire linguistiquement les stratégies de décision implicites mobilisées par l'hémisphère droit.

Afin que ce robot IAFA puisse traiter les PPC à très grande dimensionnalité en un temps raisonnable, dès 2008 nous l'avons doté d'une capacité de calculs massivement parallèles aussi bien en CPU⁴⁵ qu'en GPU⁴⁶, à l'image des premiers travaux d'accélération GPU réalisés par [Oh & Jung 2004] sur les réseaux de neurones. Remarquons que si une puissance de calcul importante est nécessaire pour la découverte du modèle et l'évaluation de sa robustesse, l'utilisation des connaissances découvertes pour réaliser des prédictions se fait en temps réel sur un ordinateur standard et en dizaines de secondes pour la recherche de prescriptions optimales⁴⁷.

La figure 1 présente un exemple de modèle découvert par notre robot IAFA. Il s'agissait d'explicitier la stratégie implicite d'un expert sensoriel évaluant une tomate fraîche sur plusieurs descripteurs sensoriels, tels que pulpeux, juteux, acide, farineux, sucré, ferme... à partir de quinze variables instrumentales caractérisant dix-sept variétés de tomates (masse, couleur, quantité de gel, quantité de sucre, quantité d'acide...). Le modèle le plus robuste et le plus compact découvert pour prédire la perception *sucrée* de la tomate est composé de quatre règles floues, soit un système de quatre équations non-linéaires. Il est intéressant de constater que le robot, procédant d'une approche holistique a fini par éliminer treize variables pour n'en garder que deux, confirmant par là même que le processus décisionnel

³⁹ Abduction : On suppose la relation causale A→B et la conclusion B. On en abduit la prémisse possible A. C'est la technique mobilisée pour la résolution d'énigmes policières ou les diagnostics médicaux. En IA Cognitiviste Bivalente, elle est aussi appelée « chaînage arrière ».

⁴⁰ Nous entendons par « compact » un modèle ayant la plus faible complexité possible. Mais un modèle compact peut très bien être complexe, dans le cas d'un PPC ! La robustesse du modèle reste donc le critère dominant lors de la sélection des modèles : à niveau de robustesse égal, nous sélectionnerons les modèles les plus compacts.

⁴¹ Les prescriptions découvertes sont des solutions floues optimales, c'est-à-dire qu'elles valident les requêtes-objectifs avec un degré de satisfaction suffisamment élevé, mais pas nécessairement de 1 tel que l'exigerait l'optimalité binaire classique. Elles sont donc des *satisficing solutions* au sens de la Rationalité Limitée d'Herbert Simon.

⁴² L'objectif assigné à un scientifique étant la découverte de modèles de connaissances pour décrire et prédire des PPC du monde réel, nous qualifions aussi un tel robot IAFA de « Scientifique Virtuel » ou de « Modélisateur Virtuel ».

⁴³ L'hémisphère droit du cerveau est dédié au traitement holistique et parallèle de l'information. Il est souvent le siège de la créativité, des émotions, des aptitudes visuo-spatiales, de la perception des visages ; c'est-à-dire des prises de décision inconscientes.

⁴⁴ L'hémisphère gauche du cerveau est dédié au traitement local et séquentiel de l'information. Il est souvent le siège de l'analyse, de la rationalité, de l'abstraction, de la logique, de la numération, du langage ; c'est-à-dire des prises de décision conscientes.

⁴⁵ La carte CPU (*Central Processing Unit*) est la carte mère de l'ordinateur. Les nouveaux CPU intègrent des processeurs multiples à N cœurs physiques et 2N cœurs logiques autorisant le calcul parallèle multi-cœurs.

⁴⁶ Une carte GPU (*Graphics Processing Unit*) est une carte graphique destinée à l'origine à fluidifier les jeux vidéo et les images de synthèse. Elle intègre un processeur puissant à M cœurs permettant de paralléliser les nombreux calculs mathématiques nécessaires pour la représentation d'images de synthèse réalistes. Nous détournons cette puissance de calcul au profit des algorithmes parallélisés de raisonnements inductif, prédictif et abductif du robot IAFA. Une station de calcul HPC (*High Performance Computing*), équipée de 4 cartes GPU de dernière génération, permet ainsi de délivrer une puissance de calculs de 51.70 Tflops en précision simple 32 bits !

⁴⁷ Le processus d'induction et de validation des modèles se fait généralement sur des stations de calcul HPC, tandis que l'exploitation des modèles validés peut se faire sur de « petits » processeurs embarqués, tels que ceux d'ordinateurs portables voire de smartphones.

sensoriel étudié, bien qu'inconscient, était relativement simple. Une interaction entre l'acidité totale et la quantité de sucres est mise en évidence. La Règle 1 précise que le cerveau humain ne détecte pas un goût sucré tant que l'acidité totale et la quantité de sucres de la tomate sont faibles. La Règle 2 montre que le sucré est perçu dès lors que la quantité de sucre est plus importante que l'acidité totale. La Règle 3 est la plus intéressante et la plus intrigante ; xtractis[®] découvre sur la tomate une stratégie utilisée par les industriels du soda pour nous faire ingurgiter jusqu'à 120g de sucres par litre⁴⁸ : lorsque l'acidité totale est importante relativement à la quantité de sucres, alors le cerveau humain est berné et n'est plus en mesure de détecter la trop grande quantité de sucres, pourtant néfaste pour la santé⁴⁹. Du fait de la quantité d'acide phosphorique qu'il contient, le soda atteint l'acidité du citron⁵⁰ !

Du paradoxe de l'induction cognitive automatique

Comme nous l'avons précédemment annoncé, la complexité du Processus/Phénomène (PP) étudié est intrinsèque au PP. Ainsi, si le PP s'avère complexe, le modèle le plus robuste et le plus compact découvert par le robot IAFA sera tout aussi complexe. De fait, même si la stratégie est exprimée sous la forme de règles de décision, il est fort vraisemblable qu'un expert humain ne puisse l'appréhender dans sa totale multi-dimensionnalité. Par contre, il sera toujours possible de forcer la simplification de ce modèle complexe (en réduisant sa dimensionnalité) pour que nous puissions comprendre la stratégie de décision sous-jacente, quitte à dégrader sa performance ; cependant, le modèle simplifié sera moins robuste que le meilleur modèle originel et ne correspondra plus au PPC qu'il était censé représenter.

V. L'IA Floue Augmentée pour une Médecine Prédicative Personnalisée

Depuis 2003, xtractis[®] a été appliqué avec succès dans plusieurs domaines et secteurs, aussi bien sur des bases de données de référence publiques que privées [Zalila & al 2004b, 2004c, 2005, 2006b, 2009, 2011a, 2011b, 2014-2016] [Zalila 2014a] [Kuhn 2006] [Amamou 2008] [Grès & al 2012, 2014, 2015] [Bernard 2013] [Jollivet & al 2012]. Les processus/phénomènes les plus complexes résolus avec succès portent sur le diagnostic précoce de pathologies humaines en médecine prédictive personnalisée épigénétique et métabolique, mettant en jeu jusqu'à 26 000 variables en interactions les unes avec les autres !⁵¹ [Zalila 2014b]. Et les modèles les plus robustes et les plus compacts découverts combinent jusqu'à une cinquantaine de variables épigénétiques, preuve en est que cette classe de problèmes fait bien partie des PPC. Que dire alors des tests commercialisés au grand public par plusieurs sociétés biotech américaines et qui promettaient, à partir du séquençage de votre génome⁵², un bilan diagnostic pour plusieurs pathologies seulement à partir de l'analyse d'un ou de deux gènes ? L'agence américaine *Food & Drug Administration* ne s'y est pas trompée et a décidé d'interdire en 2013 à ces sociétés toute commercialisation de test

génétique pour déterminer les risques de cancer, de diabète et d'Alzheimer, arguant que ces tests n'étaient pas du tout fiables et pouvaient entraîner des conséquences fâcheuses sur la santé⁵³ [Fréour 2016] [Rambaud 2016].

Exemple 1

Un laboratoire pharmaceutique ou une société Biotech souhaite minimiser le cycle de découverte d'un médicament en vue d'éradiquer un virus (*Drug Discovery*). À partir d'une base de données de référence consignait les descripteurs moléculaires de différentes molécules et, pour chacune des molécules, son efficacité sur les virus, mais aussi sa toxicité sur les cellules saines, les robots xtractis[®] GENERATE, PREDICT et OPTIMIZE permettront respectivement :

- de découvrir les règles de décision pour prédire l'efficacité d'une molécule sur le virus et sa toxicité sur les cellules saines ;
- puis d'exploiter les connaissances stables découvertes pour :

⁴⁸ Notre cerveau reptilien est dépendant du sucre, les glucides représentant la source énergétique du corps.

⁴⁹ L'OMS conseille pour l'adulte un apport journalier maximal en sucres libres de 25g pour éviter les caries, le diabète et l'obésité [Lindmeier 2015].

⁵⁰ Le potentiel Hydrogène (pH) mesure l'acidité ou la basicité d'une solution. Dans un milieu aqueux à 25 °C, une solution de pH = 7 est dite neutre ; elle sera d'autant plus acide que son pH est inférieur à 7 (pH minimum=0) et d'autant plus basique que son pH est supérieur à 7 (pH maximum=14). pH du Pepsi Cola[®]=2.3, pH du Coca Cola[®]=2.48, pH du Citron=2.3.

⁵¹ L'épigénétique démontre l'influence de l'environnement sur l'expression des gènes. Il faut donc inclure tous les critères décrivant

l'environnement de vie de la personne à diagnostiquer, en sus de près de 24 500 intensités d'expression des gènes et des variables décrivant le métabolisme de la personne.

⁵² Le séquençage génétique complet (24 500 gènes) à haut débit d'un être humain peut être aisément réalisé en quelques heures à partir d'un échantillon de salive ou de cheveu, pour moins d'un millier d'euros.

⁵³ En octobre 2015, la FDA a autorisé à nouveau la commercialisation de tests génétiques, mais limités aux maladies mono-géniques (Mucoviscidose, Drépanocytose), à l'intolérance héréditaire (lactose, alcool, caféine), aux traits physiques (couleur des yeux, nature des cheveux) ou à la filiation (origine géographique des ancêtres, test de paternité, gène de Neandertal).

- réaliser un criblage virtuel (*Virtual Screening*) de nouvelles molécules, en les testant virtuellement afin de prédire leur efficacité sur le virus et leur toxicité sur les cellules saines
- et découvrir les profils moléculaires optimaux permettant simultanément de maximiser la toxicité sur le virus et de minimiser la toxicité sur les cellules saines, tout en vérifiant des contraintes réglementaires ou de fabrication ou de coût.

Le laboratoire pharmaceutique n'aura plus qu'à synthétiser les molécules ayant ces profils moléculaires optimaux pour les tester en réel sur le virus et les cellules saines, puis à fabriquer la formulation thérapeutique correspondante. Le temps du cycle de conception de nouveaux produits s'en trouve excessivement réduit, évitant de dépenser inutilement du temps et de l'argent lors de nombreux cycles essais/erreurs.

Exemple 2

Un laboratoire médical en anatomo-pathologie souhaite accélérer et fiabiliser le diagnostic médical pour le cancer du sein⁵⁴. La base de données de référence est composée de 569 images de patientes : 357 dossiers correspondent à un diagnostic malin (cas positif=« 1 ») et 212 dossiers à un diagnostic bénin (cas négatif=« 0 »). Chaque image représente trois cellules mammaires issues de biopsies. Après prétraitement, 30 caractéristiques de chaque image sont calculées définissant les prédicteurs potentiels de ce problème de classification.

La figure 3 montre la performance d'un modèle unitaire (Expert Virtuel Individuel ou EVI) parmi les plus robustes et les plus compacts découverts par *xtractis*⁵, après avoir déployé 900 stratégies d'apprentissage différentes sur l'ensemble des 30 prédicteurs potentiels. Notons que la dimensionnalité du modèle prédictif est importante (21 prédicteurs, 3 règles) confirmant *a posteriori* le haut niveau de complexité du processus étudié, bien au-delà de la limite cognitive humaine.

En analysant les influences individuelles de chaque prédicteur, nous constatons que deux variables prédictives sortent du lot : *radius Cell 2* qui est la plus influente⁵⁵, c'est-à-dire celle qui, si elle n'était pas renseignée, entraînerait la plus importante dégradation de la prédiction ; puis *texture Cell 3* avec une influence de 0.436. Par contre, nous constatons que notre robot IAFA a retenu 19 autres variables

prédictives ayant de faibles voire excessivement faibles influences individuelles allant de 0.274 à 0.021. La robustesse du modèle en sensibilité⁵⁶ est de 95.22% et la spécificité⁵⁷ de 98.98% (Figure 3a). Que cela signifie-t-il ? Tout simplement, que sur de nouveaux dossiers de patientes à diagnostiquer, le robot IAFA estime à 4.78% le ratio de « faux négatifs » du modèle prédictif (la patiente avait le cancer du sein et le modèle s'est trompé dans son diagnostic) et à 1.02% le ratio de « faux positifs » du modèle prédictif (la patiente n'avait pas de cancer du sein et le modèle s'est trompé dans son diagnostic). Dans le cas d'un « faux négatif », la patiente rentre chez elle rassurée, au risque de développer des métastases dans les mois qui suivent ; les conséquences sont alors désastreuses aussi bien pour la patiente que pour le médecin virtuel qui pourrait être accusé de n'avoir pas sauvé sa patiente. Dans le cas d'un « faux positif », la patiente va angoisser, subir inutilement un traitement agressif de chimiothérapie, voire une ablation préventive des seins, souffrir physiquement et psychologiquement pour rien, et la Caisse d'Assurance Maladie va dépenser de l'argent pour un traitement coûteux et vain. Mais le médecin virtuel sera rassuré d'avoir sauvé sa patiente qui pourtant n'était pas en danger !

Nous pourrions alors nous demander pour quelles raisons le robot IAFA aurait-il conservé 21 variables. Raisonnons par l'absurde en adoptant une démarche modélisatrice cartésienne réductionniste incrémentale : en ne conservant que les deux prédicteurs les plus influents, le meilleur modèle possible que pourrait construire le robot IAFA, après avoir déployé 350 stratégies d'apprentissage différentes, maintiendrait l'ordre des influences individuelles des deux variables, mais dégraderait très fortement les performances prédictives du modèle. Les robustesses en sensibilité et spécificité du modèle chutent respectivement à 77.54% et 82.04% avec le modèle simplifié (Figure 3b). Les cas de faux négatifs sont de fait multipliés par 4.7 et les cas de faux positifs par 17.6 !! Ainsi, les 19 signaux faibles en synergie entre eux et en synergie avec les 2 signaux forts ont permis de bien modéliser le PPC étudié. Se priver de ces signaux faibles, en tentant à tout prix de « simplifier » la complexité, juste pour se donner l'illusion de la maîtriser, est une ineptie : cela conduit inéluctablement à des décisions erronées aux conséquences qui peuvent s'avérer coûteuses, sinon désastreuses.

En réalité, face à ce problème mathématique mal posé au sens d'Hadarnard, notre robot IAFA découvre plusieurs modèles robustes correspondant à autant d'EVI : chaque EVI

⁵⁴ Base publique de données de référence : Dr. William H. Wolberg, W. Nick Street, Olvi L. Mangasarian – University of Wisconsin [UCI Machine Learning Repository] (USA)

⁵⁵ Par convention, le prédicteur le plus influent a une influence individuelle de 1.

⁵⁶ La sensibilité (ou sensibilité) désigne le pourcentage de « vrais positifs », c'est-à-dire de cas de cancers qui sont prédits par le modèle comme tels.

⁵⁷ La spécificité désigne le pourcentage de « vrais négatifs », c'est-à-dire de cas de non-cancers qui sont prédits par le modèle comme tels.

dispose d'une stratégie de décision qui lui est propre, même si tous les EVI sont experts du même domaine. Ils utiliseront certainement un sous-groupe commun de variables prédictives, mais les compléteront par d'autres variables prédictives qui leur sont personnelles. Dès 2005, nous avons proposé de combiner ces EVI en un collège d'experts virtuels afin de rendre encore plus robuste la décision finale. Nous passons ainsi de la théorie de la décision individuelle à la théorie de la décision de groupe. Dans la présente étude de cas, le collège est composé de 1 000 EVI⁵⁸. Sa performance en robustesse estimée sur la base de validation⁵⁹ est de 98.10% en sensibilité et de 99.16% en spécificité ; sur la base de dossiers de tests⁶⁰, la sensibilité s'établit à 97.17% et la spécificité à 98.60%, ce qui confirme la très bonne estimation de la performance prédictive du modèle.

À titre de comparaison, en 1979 le système expert MYCIN pour le diagnostic médical de pathologies du sang, et avec seulement 65% de bons diagnostics, avait déjà réussi à battre les cinq experts en maladies infectieuses du *Stanford University Medical Center* jugés dans les mêmes conditions : leurs performances individuelles s'échelonnaient de 42.5% à 62.5% de diagnostics corrects [Yu & al 1979] ! Cela prouve la capacité de l'IA à concurrencer les expertises les plus

pointues jusqu'alors réservées aux seules intelligences humaines. La grande inter-variabilité des diagnostics prodigués par des experts médicaux ayant reçu la même formation universitaire laisse perplexe : un patient aurait ainsi jusqu'à 47% de chances supplémentaires d'avoir un bon diagnostic s'il rencontrait le médecin le plus qualifié que s'il se faisait diagnostiquer par le médecin le moins qualifié ! Le Système Expert a l'avantage d'être déterministe (toujours la même décision pour le même dossier) et duplicable pour assurer la disponibilité de son expertise en tout lieu et à tout instant.

Notons que l'éthique devrait toujours être questionnée dans le développement de systèmes intelligents prédictifs pour la Médecine Prédictive Épigénétique. En effet, une telle aide conçue originellement pour diagnostiquer très précocement le risque d'apparition future de pathologies et donc d'éviter leurs conséquences, pourrait être aisément retournée de manière malveillante : refus d'embaucher, d'assurer, d'octroyer un crédit à toute personne dont le diagnostic médical prédit par l'IA serait défavorable. Étant donné que le génome est formé dès la conception du fœtus, d'aucuns pourraient même être tentés de revisiter la sélection humaine eugénique...

VI. Conclusions

Avec le développement des cartes graphiques GPU et la démocratisation de leur importante puissance de calculs⁶¹, différentes applications d'Intelligence Artificielle voient le jour, en médecine, en finance, en industrie, en robotique, en traitement du langage naturel, dans la gestion de la relation client, et même en justice ou dans la détection de comportements malveillants. Si les algorithmes d'IA développés dès les années 60 peinaient à s'exprimer sur les ordinateurs de l'époque, d'ici quelques années, des robots pourront nous aider quotidiennement à diagnostiquer notre état de santé, nous coacher lors de nos achats ou dans notre carrière professionnelle, piloter les véhicules de manière autonome, décider des investissements à réaliser, ou des embauches à mener, aider les juges dans leur décision, voire coacher les politiques dans la gestion du pays dont ils

auraient la responsabilité. Après la défaite de Garry Kasparov en 1997, aucun Grand Maître d'Échecs n'est plus capable de se mesurer sans handicap à une IA, et depuis la cuisante défaite en 2016 du sud-coréen Lee Sedol, l'un des meilleurs joueurs mondiaux 9^e Dan, aucun Grand Maître de Go n'y arrivera non plus. Demain, seuls des Robots Grands Maîtres se disputeront les titres mondiaux et certainement que des grades supérieurs au 9^e dan divin devront être créés !

Nous pourrions aussi citer cet autre « succès » de l'IA passé inaperçu en 2016 : l'un des pilotes de chasse les plus expérimentés de l'US Air Force a perdu tous ses duels aériens contre une IA Floue⁶², menés sur simulateur de formation au cours d'une journée d'intenses efforts et de concentration. L'IA Floue a même réussi à le battre dans les situations de vol

⁵⁸ Résultats obtenus par xtractis® GENERATE 9.1.16139 (07/2016).

⁵⁹ La base de validation contient des dossiers de patients inconnus du modèle prédictif, qui n'ont pas été utilisés pour créer le modèle. Cette base est toutefois utilisée pour sélectionner les EVI les plus performants, ceux qui feront partie du collège final d'EVI.

⁶⁰ La base de test contient des dossiers de patients inconnus du modèle prédictif, qui ne sont utilisés ni pour créer, ni pour sélectionner le modèle. C'est l'estimateur le plus fiable de la performance réelle du modèle prédictif.

⁶¹ IBM Deep Blue, le premier ordinateur à avoir battu un Grand Maître d'Échecs Champion du Monde en titre (Garry Kasparov) lors d'un match complet, déployait en mai 1997 une puissance de calcul de 11.38 Gflops

[Wikipédia 2]. En décembre 2016, une station de calcul Haute Performance équipée de 4 cartes GPU Nvidia Titan X Pascal délivre une puissance de calcul de 45.16 Tflops, soit près de 4 000 fois plus que celle de Deep Blue !

⁶² Cette IA Floue dénommée Alpha, développée par l'University of Cincinnati et sa spin-off Psybernetix, avec le soutien de l'US Air Force Research Laboratory, avait déjà réussi à battre d'autres IA adversaires en combat aérien. Elle est capable d'analyser en détails et en temps réel chaque nouveau scénario dynamique de combat, puis de décider des actions à entreprendre, le tout en moins d'1 milliseconde ! Soit 250 à 300 fois plus vite qu'un clignement de paupière du pilote de chasse humain...

dégradé (vitesse, manœuvrabilité, capteurs, des systèmes d'armes). « *C'est l'IA la plus agressive, la plus rapide, la plus dynamique et la plus crédible que j'ai pu voir à ce jour (...)* Elle semblait être consciente de mes intentions (...) Elle changeait instantanément entre des actions défensives et offensives dès que nécessaire. » selon le Colonel Gene Lee [Reilly 2016]. Et si demain, des robots soldats, des robots policiers ou des drones intelligents recevaient l'autorisation de tuer de manière autonome ? Sans nul doute certains politiques seraient-ils tentés de les déployer, invoquant la préservation des vies des soldats humains sur les nouveaux terrains de combats (guérilla urbaine, défense contre les attaques terroristes). Aujourd'hui, les chefs d'état ordonnent bien aux services spéciaux de « neutraliser » des responsables terroristes ou politiques ; demain, un Robot Espion pourrait être chargé de cette tâche « hors-la-loi ».

Sans conteste, les Robots Intelligents seront impliqués pour nous aider dans notre vie quotidienne. Toutefois, ils finiront par remplacer l'Homme dans quasiment toutes les tâches qu'il réalisait jusqu'alors, des plus routinières (nettoyer, ramasser les ordures, rechercher dans les rayonnages d'un grand entrepôt les articles commandés en ligne, transporter des marchandises ou des personnes⁶³), des plus dangereuses (colmater une brèche dans une centrale nucléaire, travailler dans les mines ou sur les chantiers en altitude, explorer les abysses ou d'autres contrées de l'univers), des plus intellectuelles (centre d'appel, diagnostic médical, opération chirurgicale, analyse de risque financier⁶⁴, décision de justice), aux plus artistiques (génération de partition, de peinture, de sculpture, d'œuvre littéraire).

Tout au long de cet article, nous avons évoqué la capacité du robot IAFA xtractis® à modéliser avec robustesse des PPC. Les nombreuses études, publiques et privées, que nous avons réalisées depuis 2003 montrent qu'il bat quasi-systématiquement l'Expert-métier, l'Ingénieur modélisateur ou le Scientifique. D'ailleurs, je l'ai même proposé à mes confrères universitaires pour analyser la véracité de travaux en sciences expérimentales : il suffirait de lui soumettre la base de données de référence à partir de laquelle les auteurs d'une publication scientifique auraient réussi à produire leurs modèles, pour que notre robot IAFA puisse évaluer si un modèle prédictif robuste existe bien, en l'exhibant, ou, dans le cas contraire, réfuter les résultats présentés et refuser la publication du dit article ! Un grand chamboulement dans la publication scientifique en perspective, jusqu'alors dirigée par la fameuse loi du « Publie ou Périr »... [Barthélémy 2013]

Si un robot venait à découvrir des résultats scientifiques majeurs en Médecine, en Économie, en Physique ou en

Chimie, qui serait le détenteur du Prix Nobel ? Le Robot Intelligent ou le Scientifique Humain qui lui a fourni les bases de données et qui a publié les résultats des découvertes réalisées par le robot ? Peut-être assisterait-on alors à une bataille scientifique entre robots pour s'adjuger ces prix prestigieux ? Avec le traitement automatisé du Langage Naturel, de plus en plus efficace, il se pourrait même que le Prix Nobel de Littérature ne soit plus à l'abri d'un robot écrivain ! Qui détiendrait alors les droits d'auteur d'une œuvre intellectuelle entièrement réalisée par un robot ? Plusieurs questionnements de droit ne cesseront de se poser et nous imposeront sans nul doute une extension de l'arsenal juridique.

Le Prix Nobel de la Paix serait l'unique récompense encore à la portée de l'Homme, du moins tant qu'un robot ne pourra faire preuve d'empathie et d'intelligence émotionnelle interpersonnelle. Mais tout bien pensé, peut-être même qu'il y arriverait en découvrant des solutions originales aux conflits actuels ou en prédisant les actions politiques, diplomatiques, économiques ou sociétales à mener pour éviter l'apparition de tels conflits. Si un robot avait été capable d'évaluer de manière objective le niveau de bien-être et de bonheur des populations arabes, autrement qu'au travers d'indicateurs économiques biaisés fondés presque exclusivement sur les rentes touristiques, les diplomaties occidentales auraient-elles pu anticiper les conséquences directes ou collatérales subies par les pays du monde entier depuis la révolution tunisienne du jasmin menée en janvier 2011 ?

La nouvelle économie du bien-être ou du bonheur [Davoine 2009] nous incite à revisiter nos métriques standards de la richesse ou du développement économique d'un pays. Qui accepterait encore cette mesure qu'est le PIB, s'il savait que son accroissement était aussi directement lié à l'augmentation du nombre de malades ou de bouchons sur les routes ou de conflits, consécutivement à une consommation accrue du nombre de médicaments, de carburant et de systèmes d'armes ? Pis encore, savez-vous par exemple que les deux règles de bonne conduite budgétaire inscrites en 1992 dans le Traité de Maastricht, limitant le déficit public à 3% et la dette publique à 60% du PIB, ont été édictées de manière subjective et arbitraire en 1981 par trois hauts fonctionnaires de François Mitterrand [Charrel 2017]. Pourtant, de tels raisonnements monocritères et binaires ne distinguent pas le « bon » déficit relatif aux investissements d'avenir dans l'enseignement et la recherche qui soutiendraient une croissance future, de la mauvaise dette induite par des augmentations des dépenses de fonctionnement de l'État. De même, le Japon ne semble

⁶³ Un rapport publié par le gouvernement américain souligne la menace directe que fait planer l'IA des véhicules autonomes sur 2.2 à 3.1 millions d'emplois du secteur des transports [Porrometo 2016].

⁶⁴ La société d'assurance vie japonaise *Fukoku Mutual Life Insurance* annonce que l'IA *IBM Watson Explorer* va remplacer 34 postes occupés par ses employés (25% du personnel) [Porrometo 2017].

pas au bord du précipice avec une dette frisant 240% du PIB, prouvant que le niveau de soutenabilité de la dette souveraine est multicritère ! En effet, il serait bien plus difficile à l'Économiste d'avoir à combiner de multiples facteurs objectifs et subjectifs relatifs à la vie des citoyens pour inventer de nouveaux indicateurs complexes, plus fidèles au niveau de bien-être et de bonheur des citoyens. Mais, comme nous venons de le voir en détails, le cerveau de l'Homme est en l'état incapable de gérer seul les PPC. D'où sa fâcheuse tendance à vouloir simplifier le PPC pour se donner l'impression de le maîtriser. Ne vous inquiétez pas chers concitoyens, tout est sous contrôle ! En réalité, peu de politiciens admettent que l'existence même des différentes crises internationales (sociétale, économique, financière, environnementale, sociétale, politique) est la preuve incontestable de l'impuissance de l'Homme à juguler de telles crises. De multiples facteurs endogènes et exogènes en interactions et le PPC ne manqueront pas de toquer à votre porte... Depuis le XIX^e siècle, plusieurs modèles politico-économiques ont été proposés par des penseurs. Tous sans exception ont échoué, du communisme à l'ultra-libéralisme, invitant l'Homme à dépasser la bivalence de sa pensée qu'il s'est lui-même imposé : Droite contre Gauche, Démocrate contre Républicain, Travailleur contre Conservateur... La politique est souvent la bataille stérile de la binarité : Aristote aurait été bien à son aise dans nos assemblées pour arbitrer les joutes oratoires des partis politiques. Plus de 2 350 ans après, les sociétés occidentales sont malheureusement toujours engluées dans cette vision dualiste du Monde héritée des penseurs de la Grèce Antique. À l'image des sociétés orientales, osons introduire plus de nuances et d'harmonie, en autorisant de la complémentarité dans les différences, d'être à la fois « Noir et Blanc »⁶⁵, Mâle et Femelle », « Droite et Gauche » et nous pourrions certainement faire émerger des solutions viables contribuant au progrès de l'Humanité. Au risque d'offusquer les fervents défenseurs de la non-contradiction grecque, le Monde est en perpétuel changement et empli de contradictions [Nisbett 2003].

La question majeure que nous sommes en droit de poser est plus économique et sociologique : si le travail mécanisé et répétitif a fini par aliéner l'Homme qui ne vit plus que pour travailler, au lieu de travailler pour vivre, quel type de travail lui incombera-t-il encore, dans un futur proche, lorsque la plupart des tâches seront pleinement réalisées par des Robots Intelligents ? Comment pourrions-nous vivre sans travailler et donc sans percevoir les revenus d'un travail

disparu ? Des économistes ont déjà réfléchi à cette situation fortement probable et proposent que l'État distribue à chacun de ses citoyens un revenu universel unique sans conditions, tout au long de sa vie, que le bénéficiaire pourra compléter par n'importe quelle autre source de revenu [Damgé 2016]⁶⁶. Peut-être que les plus intelligents de nos semblables arrondiraient-ils leurs fins de mois en créant des Robots Intelligents dont ils loueraient les services pour la réalisation des tâches susvisées⁶⁷. Mais dans un tel cas de figure, le robot doté d'une pleine autonomie pourrait-il refuser de travailler pour le compte d'un Homme sans contrepartie ? *In fine*, ne pourrions-nous pas imaginer qu'un Robot Intelligent puisse avoir la capacité de créer d'autres Robots Intelligents et de louer les services de ses congénères, reproduisant de fait une exploitation de ses semblables déjà pratiquée par l'Homme envers l'Homme des millénaires durant ? Arriverons-nous un jour à devoir édicter les « Droits du Robot et du Citoyen-Robot » qui régiront la liberté de pensée et de parole des Robots, les relations Robot-Homme et Robot-Robot ? D'ailleurs, le Parlement Européen a édité un rapport préconisant d'établir une « *classification des robots autonomes et intelligents* » et de leur imposer une « *immatriculation individuelle* ». Le rapport propose d'obliger les entreprises à « *notifier l'étendue de la part de la contribution de la robotique (...) à leurs résultats financiers, à des fins de fiscalité et de calcul des cotisations sociales* » et « *d'envisager sérieusement l'instauration d'un revenu universel de base* ». Plus encore, les eurodéputés préconisent de légiférer sur la responsabilité civile des robots par « *la création d'une personnalité juridique spécifique aux robots pour qu'au moins les robots autonomes les plus sophistiqués puissent être considérés comme des personnes électroniques dotées de droits et devoirs bien précis* » [Perrotte 2017].

Dans ce cas, pourquoi le Robot Intelligent accepterait-il encore les ordres de l'Homme aux capacités cognitives beaucoup plus limitées, et pourquoi n'essayerait-il pas d'utiliser son Intelligence Artificielle de manière malveillante pour asservir l'Intelligence Humaine, voire la détruire ? L'astrophysicien britannique Stephen Hawking estime ainsi que « *l'IA pourrait mettre fin à l'Humanité* », tandis qu'Elon Musk, le fondateur des sociétés *Tesla* et *SpaceX*, pense qu'« *elle pourrait être plus dangereuse que les bombes nucléaires* » [Tual 2016]. Mais ceci est une autre longue histoire dont nous ne manquerons pas de vous relater les dernières avancées dans un prochain épisode. Je suis obligé de vous quitter, xtractis[®] vient de m'annoncer qu'il avait

⁶⁵ Le symbole taoïste Yin-Yang de la philosophie chinoise en est un bel exemple : le Blanc et le Noir s'interpénètrent et sont mutuellement inclus l'un dans l'autre.

⁶⁶ Depuis janvier 2017, la Finlande est le premier pays européen à expérimenter le revenu universel au niveau national et pour une durée de deux ans [Geoffroy 2017a]. Depuis février 2017, l'association

allemande *Mein Grundeinkommen* fait appel au crowdfunding pour financer un revenu universel mensuel net de 1 000 euros pendant 1 an, à des personnes tirées au sort sans aucune condition de nationalité, ni d'âge [Geoffroy 2017b].

⁶⁷ C'est déjà le cas des sociétés d'IA, telles *IBM* ou *intellitech*, qui louent le travail intellectuel de Robots Intelligents à des sociétés clientes pour la résolution de différents problèmes complexes !

résolu le problème complexe et stratégique en Analyse de Risque Financier, que nous lui avons soumis il y a moins de trois semaines...

Épilogue

Nous suggérons donc un nouveau test de l'« intelligence de machines », plus extensif que l'*Imitation Game* imaginé par Turing en 1950.

Nous qualifierons un Robot d'**Intelligent** s'il sait découvrir de manière autonome, à partir de ses expériences passées, les meilleures stratégies de décision possibles qui lui permettent non seulement d'expliquer les situations antérieures, mais surtout de prendre de manière autonome les meilleures décisions possibles lorsqu'il est confronté à

des situations inconnues : un excellent exemple d'adaptation « darwinienne » à un environnement dynamiquement changeant !

En utilisation la définition susvisée de la robustesse, nous énonçons qu'un **Robot Intelligent doit être capable de découvrir de manière autonome, les stratégies d'apprentissage les plus robustes possibles qui, à partir de ses expériences passées, lui permette de découvrir les stratégies de décision les plus robustes possibles**⁶⁸. Aussi l'IA Floue Augmentée, que nous défendons, se libère-t-elle de son carcan originel mimétique de l'Intelligence Humaine, et refonde-t-elle son objet d'étude autour de la conception de Robots Intelligents sous toutes ses formes.

VII. Références

Amamou, Y. (2008) *Analyse de traces et modélisation des stratégies d'exploration perceptive via un dispositif de couplage sensori-moteur minimaliste*. Thèse de Doctorat, Science de l'Homme et Technologies de la Cognition et de la Coopération, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, 2008COMP1757, 188 p.

Auto-innovations (2008) *Xpark!, l'application de la logique floue pour le stationnement semi-automatique*. Gazeau Y., www.auto-innovations.com

Barthélémy, P. (2013) Doutes sur la fiabilité des neurosciences. *LeMonde.fr*, 14 avril, <http://passeurdesciences.blog.lemonde.fr/2013/04/14/doutes-sur-la-fiabilite-des-neurosciences/>

Bernard, A.-F. (2013) *Influence du stage chez le praticien sur les projets professionnels des internes de médecine générale en Picardie*. Thèse de Doctorat en Médecine, spécialité Médecine Générale, Université de Picardie Jules Verne, Faculté de Médecine d'Amiens, 28 juin, 2013-54, 73 p.

Charrel, M. (2017) *Les 3% de déficit, une règle arbitraire née sur un coin de table*. *Le Monde Économie*, 6 février, http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/02/06/les-3-de-deficit-une-regle-arbitraire-nee-sur-un-coin-de-table_5075181_3234.html

Cybenko, G. (1989) Approximations by superpositions of sigmoidal functions. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2 (4), 303-314.

Damgé, M. (2016) Carte : le revenu universel et ses expérimentations dans le monde. *Le Monde*, 5 juin, http://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2016/06/05/carte-le-revenu-universel-et-ses-experimentations-dans-le-monde_4936892_4355770.html

Davoine, L. (2009) L'économie du bonheur. Quel intérêt pour les politiques publiques ? *Revue économique*, 4, Vol. 60, Presses de Sciences Po, 905-926.

De Pracontal, M. (2016) Comment Google est devenu maître du jeu de go. 9 mars, *Mediapart.fr*, 4p, www.mediapart.fr

Descartes, R. (1637) *Discours de la méthode*. 2^e partie, Tome I, Édition établie par Victor Cousin, 1824, Levrault, 212 p.

Dreyfus, H. (1965) *Alchemy and Artificial Intelligence*. P-3244, December, RAND Corporation, 98p.

Dubois D., Prade H. (1988) (avec la collaboration de Farreny H., Martin-Clouaire R., Testemale C.) *Théorie des Possibilités - Applications à la représentation des connaissances en informatique*. 2^e édition, Masson.

Fodor, J.A. (1975) *The Language of Thought*. Harvard University Press, 214p.

Fréour, P. (2016) Test génétiques : il est urgent d'ouvrir le débat. *Le Figaro*, 28 janvier, 9.

⁶⁸ Le robot IAFA xtractis[®] valide bien cette définition.

- Geoffroy, R.** (2017a) La Finlande commence à expérimenter le revenu universel. *Le Monde.fr / AFP*, 1^{er} janvier, http://www.lemonde.fr/europe/article/2017/01/01/la-finlande-commence-a-experimenter-le-revenu-universel_5056148_3214.html
- Geoffroy, R.** (2017b) L'Allemagne expérimente le revenu universel grâce au crowdfunding. *Le Monde*, 7 février, http://www.lemonde.fr/revenu-universel/article/2017/02/07/l-allemande-experimente-le-revenu-universel-grace-au-crowdfunding_5076073_5070036.html
- Grès, S., Gapenne, O., Zalila, Z., Gueydan, G.** (2012) Human safe interaction path for designing an international reference mission for space exploration (inner part of the solar system). *Proceedings 1st ASTech International Conference Space Exploration "Developing Space"*, Session n°9 "Human Factors: considerations for Future Space Exploration en Route to Mars", Paris, December 17-19, 10p.
- Grès, S., Tognini, M., Le Cardinal, G., Zalila, Z., Gueydan, G.** (2014) Cooperation and dialogical modeling for designing a safe Human space exploration mission to Mars. *Acta Astronautica*, 104, 2, November-December, Future of Space Exploration: Towards the Stars, Elsevier, 502-508.
- Grès, S., Clervoy, J.-F., Tognini, M., Le Cardinal, G., Zalila, Z.** (2015). Designing safe and reliable versatile international reference mission an integrated approach lead by risks perceptions and evaluations. *Proceedings 9th International Academy of Astronautics, Symposium on the Future of Space Exploration: Towards New Global Programs*, Turin, Italy, 7-9 July, 14p.
- Gueydan, G., Zalila, Z.** (2003) Contribution de la logique floue à la conception d'un système d'assistance au parage en créneau : exemple du placement. *Actes des Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications LFA 2003*, Tours, 26-27 novembre 2003, Cépaduès-Éditions, 177-184.
- Hackett, J.** (Ed.) (1996) *Roger Bacon & the Sciences. Commemorative Essays*. Brill, 439p.
- Hadamard, J.** (1902) Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. *Princeton University Bulletin*, 13, 49-52.
- Hayes, J.R.** (1962) *Human Data Processing Limits in Decision Making*. Report No ESD-TDR-62-48, Air Force Systems Command, Electronics System Division, Bedford, Massachusetts.
- Hebb, D.O.** (1949) *The Organization of Behavior*. Wiley, New York.
- Hornik, K.** (1991) Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks. *Neural Networks*, Vol. 4, No 2, 251-257.
- Ivakhnenko, A. G., Lapa, V. G.** (1965) *Cybernetic Predicting Devices*. CCM Information Corporation.
- Jang, J.-S.R.** (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, May-June, Vol. 23, No. 3, 665-685.
- Japon IA** (1989) 100 applications de la logique floue. Supplément diffusé par *La Lettre de l'Intelligence Artificielle*, n°1, septembre, 10-13.
- Jollivet, P., Gueydan, G., Jullien, N., Moulier-Boutang, Y., Vicente, M., Zalila, Z.** (2012) How to become a regular/big Wikipedia contributor? A robust fuzzy predictive model of the propensity to contribute based on a French survey. *Proceedings EcoMod 2012, International Conference on Economic Modeling*, Seville, Spain, July 4-6, 26p.
- Kosko, B.** (1992) Fuzzy systems as universal approximators. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, FUZZ-IEEE FUZZ92, San Diego, 1153-1162.
- Kuhn, F.** (2006), *Performance prediction for high-tech start-ups: toward the quantification of an integrative framework using fuzzy theory*. Thèse de Doctorat, Science de l'Homme et Technologies de la Cognition et de la Coopération, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, 14 décembre, 190 p.
- Kuhnen, C.M., Knutson, B.** (2005) The Neural Basis of Financial Risk Taking. *Neuron*, vol. 47, No. 5, 763-770.
- Leondes, C.T.** (Ed.) (1998) *Fuzzy Logic and Experts Systems Applications*. Neural network systems techniques and applications, Academic Press, San Francisco, CA, USA, 415p.
- Lettvin, J.Y., Maturana, H.R., McCulloch, W.S., & Pitts, W.H.** (1959) What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain. *Proceedings of the IRE*, Vol. 47, No. 11, 1940-1951.
- Lindmeier, C.** (2015) *L'OMS appelle les pays à réduire l'apport en sucres chez l'adulte et l'enfant*. 4 mars, Genève, Suisse, <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2015/sugar-guideline/fr/>
- Linnainmaa, S.** (1970) *The representation of the cumulative rounding error of an algorithm as a Taylor expansion of the local rounding errors*. Master's Thesis (in Finnish), Univ. Helsinki, Finland.

- Liu, P., Li, H.-X.** (2004) *Fuzzy Neural Network Theory and Application*. Series in Machine Perception & Artificial Intelligence, Vol. 59, World Scientific, Singapore, 2004, 377p.
- Lukasiewicz, J.** (1920-1939a) On 3-valued logic. In: *Polish logic 1920-1939*, McCall S., Oxford University Press, 1967.
- Lukasiewicz, J.** (1920-1939b) Many-valued systems of propositional logic. In: *Polish logic 1920-1939*, McCall S., Oxford University Press, 1967.
- Marewski, J., Gigerenzer, G.** (2012) Heuristic decision making in medicine. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, vol. 14, n° 1, 77–89.
- Miller, G.A.** (1956) The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological Review*, 63, 81–97.
- Minsky, M.** (1952) *A Neural-Analogue Calculator Based upon a Probability Model of Reinforcement*. Psychological Laboratories, Harvard University, Cambridge, MA, USA.
- Minsky, M.** (1954) *Theory of Neural-Analog Reinforcement System and its Applications to the Brain-Model Problem*. Ph.D. Thesis, University of Princeton, Princeton, NJ, USA.
- Minsky, M., Papert, S.** (1969) *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*. The MIT Press, 268p.
- Mitchell, T.M.** (1997) *Machine Learning*. McGraw-Hill International Editions, 414p.
- Newell, A.; Shaw, J.C.; Simon, H.A.** (1959) Report on a general problem-solving program. *Proceedings of the International Conference on Information Processing*, June 13–23, UNESCO House, Paris, France, 256–264.
- Nisbett, R.E** (2003) *The Geography of Thought: How Asians and Westerners Think Differently...and Why*. The Free Press, New York, 263p.
- Oh, K., Jung, K.** (2004) GPU implementation of neural networks. *Pattern Recognition*, 37, 1311–1314.
- Parthenay, C.** (2005) *Herbert Simon: rationalité limitée, théorie des organisations et sciences de l'artificiel*. Document de Travail CEPN, Paris XIII et Université de Cergy-Pontoise, France, 28p. <https://fr.scribd.com/doc/48024844/Herbert-Simon-la-rationalite-limitee-article-de-Claude-Parthenay>
- Perrotte, D.** (2017) Le Parlement européen veut taxer les robots destructeurs d'emploi. *LesEchos.fr*, 12 janvier, www.lesechos.fr/monde/europe/0211686455347-le-parlement-europeen-veut-taxer-les-robots-destructeurs-demploi-2056702.php#e2mZG8t5fS8dWvPx.99
- Porrometo, G.** (2016) Washington s'inquiète des conséquences de l'IA sur le monde du travail. *Numerama*, 22 décembre, <http://www.numerama.com/politique/219002-washington-sinquiete-des-consequences-de-lia-sur-le-monde-du-travail.html>
- Porrometo, G.** (2017) Une I.A. remplace 34 employés d'une assurance au Japon. *Numerama*, 3 janvier, <http://www.numerama.com/tech/221747-une-i-a-remplace-34-employes-dune-assurance-au-japon.html>
- Reilly, M.B.** (2016) Beyond video games: New Artificial Intelligence beats tactical experts in combat simulation. *PhysOrg*, June 27, <http://phys.org/news/2016-06-video-games-artificial-intelligence-tactical.html>
- Rambaud, A.** (2016) Des tests en vente libre aux États-Unis. *Le Figaro*, 28 janvier, 9.
- Rosenblatt, F.** (1957) *The Perceptron--a perceiving and recognizing automaton*. Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Laboratory.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G.E, Williams, R. J.** (1986) Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323 (6088), 533–536.
- Schmidhuber, J.** (2015). Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*, Volume 61, January 2015, 85–117.
- Shortliffe, E. H., Buchanan, B.G.** (1975) A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences* 23 (3-4), 351-379.
- Simon, H.A.** (1955) A behavioural model of rational choice. *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 69, 99–118.
- Simon, H.A.** (1957) *Models of Man: Social and Rational*. John Wiley & Sons, New York, 279p.
- Terano, T., Asai, K., Sugeno, M.** (Eds) (1989) (traduction de Charles Aschmann, 1994) *Applied Fuzzy Systems*. Academic Press Professional, 301p.
- Thorne, K.S. & al** (2016) Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116 (6).
- Tual, M.** (2016) Intelligence Artificielle: les géants du Web lancent un partenariat sur l'éthique. *Le Monde*, 28 septembre, http://www.lemonde.fr/pixels/article/2016/09/28/intelligence-artificielle-les-geants-du-web-lancent-un-partenariat-sur-l-ethique_5005123_4408996.html

- Turing, A.** (1936) On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem*. vol. 2:42, coll. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 230-265
- Turing, A.** (1950) Computing Machinery and Intelligence. *Mind - A Quarterly Review of Psychology and Philosophy*, Vol. 59, No. 236, October, 433-460. New York: Thomas Nelson & Sons, Ltd.
- Von Mises, L.** (1949) (traduction de Raoul Audouin, 1985), *L'action humaine : Traité d'économie*. coll. « Libre échange », PUF, Paris.
<http://herve.dequengo.free.fr/Mises/AH/AH0.htm>
- Wang L.X., Mendel J.M.** (1992) Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal least square learning. *IEEE Trans. Neural Networks*. 3, 807-814.
- Werbos, P.** (1974) *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences*. PhD thesis, Harvard University.
- Werbos, P.** (1981-1982) Applications of advances in nonlinear sensitivity analysis. In: Drenick, R.F. Kozin, F. (Eds): *System Modeling and Optimization: Proc. 10th IFIP Conference, New York City, USA, August 31-September 4, 1981*, Springer-Verlag, 762-770.
- Wikipedia** (1). *Histoire de l'Intelligence Artificielle*.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l'intelligence_artificielle
- Wikipedia** (2). *Théorème de Sonnenschein*.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Sonnenschein
- Wikipedia** (3). *Rasoir d'Ockham*.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Rasoir_d%27Ockham#Concepts_similaires
- Yu, V.L., Fagan, L.M., Wraith, S.M., Clancey, W.J., Scott, A.C., Hannigan, J., Blum, R.L., Buchanan, B.G., Cohen, S.N.** (1979) Antimicrobial Selection by a Computer: A Blinded Evaluation by Infectious Diseases Experts. *JAMA*. 242(12), 1279-1282.
- Zadeh, L.A.** (1965) Fuzzy sets. *Information and Control*. 8, 338-353, June.
- Zadeh, L.A.** (1968) Fuzzy algorithms. *Information and Control*. 12, 94-102.
- Zadeh, L.A.** (1973) Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 3, 28-44.
- Zadeh, L.A.** (1975) The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Science*. Part 1: 8, 199-249; part 2: 8, 301-357; part 3: 9, 43-80.
- Zadeh, L.A.** (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 1, 3-28.
- Zalila, Z.** (1993) *Contribution à une théorie des relations floues d'ordre n*. Thèse de Doctorat en Contrôle des Systèmes, D 573, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, mars, 474 p.
- Zalila, Z.** (2003) Évaluation subjective : les mathématiques du flou, une voie vers les testeurs numériques? *Actes 5^e Rencontres du Marketing Sensoriel, Comment donner du sens à son produit : méthodes et outils d'évaluation de la qualité perçue*, EUROSYN Human Engineering, Paris, 14 janvier, 43-62.
- Zalila, Z.** (1993-2016) *Mathématiques du flou : concepts et applications*. Cours de l'Unité de Valeur SY10, v25.2, Sorbonne Universités | Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, novembre 2016, 209p.
- Zalila, Z.** (2006-2013) *Logique floue et systèmes d'inférence floue : Introduction et propriétés*, White Paper, v2.4, Intellitech, Compiègne, décembre 2013, 13 p,
<http://xtractis.ai/fr/approche-mathematique-algorithmique-unique/>
- Zalila, Z.** (2014a) Modélisation prédictive robuste pour l'analyse de risque et la détection de comportement malveillant. *Forum Decideo Québec*, Québec city, QC, Canada, 10 juin, 30 p.
<http://www.forumdecideo.com/videos/recent/?p=4>
- Zalila, Z.** (2014b) Robust Predictive Modeling – xtractis®: a smart robot for Personalized Medicine. *Ubistart 2014*, UbiFrance & Galien Foundation, The New York Academy of Sciences, New York City, NY, USA, July 10, 5p.
- Zalila, Z., Lézy, P.** (1993) Contribution de la Logique Floue pour la réalisation d'un régulateur vitesse/distance d'un véhicule. *Actes du 1^{er} Colloque International CONVERGENCE'93 Aéronautique et Automobile*, Session 10 Logique Floue et ses applications, Paris, 1-3 décembre, 17 p.
- Zalila, Z., Lézy, P.** (1995) Fuzzy/classic hybrid controller for the longitudinal control of an autonomous vehicle. In: *Fuzzy Logic and Soft Computing*. (B. Bouchon-Meunier, R. R. Yager, L. A. Zadeh, Eds), Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory, vol. 4, World Scientific Publishing, Singapore, 434-443.

- Zalila, Z., Coffin, F.** (1996) A trajectory managing aiding system through a fuzzy supervision. *Proceedings of the 6th IPMU International Conference*, Information Processing and Management of Uncertainty in knowledge-based systems, Granada, SPAIN, July 1-5, Volume I, 67-73.
- Zalila, Z., Assemat, C., Bodineau, G., Compagnon, A., Marbach, T., Ladreyt, T.** (1998a) Système de supervision et de diagnostic flous des actions conducteur sur le volant. Application à l'accostage automatique d'autobus. *Actes 7^e conférence internationale IPMU*, Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems, Paris, 6-10 juillet, Volume II, 964-972.
- Zalila, Z., Fatene, M., Kadhi, R.** (1998b) Fuzzy supervision in Statistical Process Control. *Proceedings of 1998 IEEE international conference on Systems, Man and Cybernetics*, SMC'98, October 11-14, La Jolla, San Diego, California, USA, session MPO3, 638-643.
- Zalila, Z., Bonnay, F., Coffin, F.** (1998c) Lateral guidance of an autonomous vehicle by a fuzzy logic controller. *Proceedings of 1998 IEEE international conference on Systems, Man and Cybernetics*, SMC'98, October 11-14, La Jolla, San Diego, California, USA, session TA08, 1996-2001.
- Zalila, Z., Fauvel, F., Dayre, E.** (1998d) Superviseur adaptatif de transmission automatique fondé sur une évaluation multicritère floue, *Actes des Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications LFA'98*, Rennes, 18-19 novembre, Cépaduès-Éditions, 97-105.
- Zalila, Z., Bonnay, F., Coffin, F.** (1998e) Système copilote flou pour le guidage d'un véhicule automobile sur rail virtuel, *Actes des Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications LFA'98*, Rennes, 18-19 novembre, Cépaduès-Éditions, 37-44.
- Zalila, Z., Fauvel, F., Ho, B.L., Dayre, E.** (2000) Automatic transmission adaptive supervisor based on a fuzzy multicriterion evaluation. *Proceedings of the 8th IPMU International Conference*, Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems, Madrid, Spain, July 3-7, Volume III, 1620-1628.
- Zalila, Z., Gueydan, G.** (2000) *Procédé et dispositif pour la prise en charge du parcage en créneau de véhicules motorisés*. Brevet français n°FR2806998, déposé par Intellitech le 31/3/00.
- Zalila, Z., Benizri, J., Gueydan, G., Lorel, C., Romieu, P.** (2004a), Fuzzy system for an Emergency Braking Aid (AFU). *Proceedings 10th IPMU International Conference*, Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems, Perugia, Italy, July 4-9, Volume 3, 2025-2030.
- Zalila, Z., Penet, C., Lageat, T., Cuquemelle, J., Assemat, C., de Larrard, B., Chikh, A.** (2004b) Contribution of fuzzy mathematics to the predictive modelling of virtual testers/experts. Application to the subjective evaluation of Champagne wines. *7th Sensometrics Conference*, Oral Presentation, Davis, California, USA, July 28-30.
- Zalila, Z., Cuquemelle, J., Assemat, C., Penet, C., Chikh, A., Marbach, S., Deschamps, D., Sauvage, E.** (2004c) Contribution of fuzzy mathematics to the predictive modelling of virtual testers/experts. Application to the subjective evaluation of tomatoes. *7th Sensometrics Conference*, Poster Session, Davis, California, USA, July 28-30.
- Zalila, Z., Davodeau, S., Assemat, C., Cuquemelle, J., Chikh, A., Deschamps, D., Marbach, S., Lorentz, B., Penet, C.** (2005) xtractis[®] fuzzy predictive models for virtual testing and prototyping. Sensory evaluation of cheese spreadability. *6th Pangborn Sensory Science Symposium*, Poster Theme 1 Challenging the Boundaries, Harrogate International Centre, Harrogate, North Yorkshire, UK, August 7-11.
- Zalila, Z., Cuquemelle, J., Penet, C., Lorentz, B.** (2006a) Is your accurate model actually robust? *8th Sensometrics Meeting: "Imagine the Senses"*, Oral Presentation, Ås, Norway, August 2-4, 32 p.
- Zalila, Z., Cuquemelle, J., Penet, C., Deschamps, D., Chikh, A., Lorentz, B.** (2006b) Fuzzy systems to explain and predict the influence of storage conditions on the sensory profile of a salad dressing. *8th Sensometrics Meeting: "Imagine the Senses"*, Oral Presentation, Workshop I (Longitudinal sensory data), Ås, Norway, August 2-4.
- Zalila, Z., Cuquemelle, J., Penet, C., Lorentz, B.** (2007) Why Cross-Validation Methods are particularly relevant to robust Modeling? Interests in Sensory Science. *7th Pangborn Sensory Science Symposium*, Poster Session 6 Sensometrics, Hyatt Regency, Minneapolis, MN, USA, August 12-16.
- Zalila, Z., Cuquemelle, J., Chikh, A., Penet, C., Lorentz, B., Deschamps, D.** (2008) Contribution of xtractis[®] methodology to the automatic extraction of robust fuzzy models. Application to the prediction of consumer liking and sensory evaluation, and to the optimization of product formulation. *Proceedings AgroStat 2008*, 10th European Symposium on Statistical Methods for the Food Industry, Louvain-la-Neuve, Belgium, January 22-25, 187-199.
- Zalila, Z., Mehinagic, E., Cuquemelle, J., Profizi, A.-V., Texier, F., Toulgoat, S., Saint-Eve, A., Lorentz, B.** (2009) Identification and prediction of robust non-linear relationships between recipes, instrumental measurements and sensory evaluation of cake texture and flavour with

xtractis® fuzzy models: Application to the discovery of optimal recipes. *8th Pangborn Sensory Science Symposium*, Poster Session 2 Effective Use of Sensory Evaluation, Stazione Leopolda, Florence, Italy, 26-30 July.

Zalila, Z., Gueydan, G., Cuquemelle, J., Marbach, S. (2011a) Evaluation of Toxicity of Pesticide Residues in Agriculture with xtractis® Fuzzy Models. *Merck IDEA Days 2011, Insights into Data Exploration & Analysis*, Edison, New Jersey, USA, 18-19 January.

Zalila, Z., Dumont, P., Gueydan, G., Cuquemelle, J., Gelsomino, M., Redon, S., Lorentz, B. (2011b) Identification and Prediction of Robust Non-Linear Relationships between Instrumental Measurements, Sensory Evaluation and Consumer Liking of Automotive Materials with xtractis® Fuzzy Models. Application to the Discovery of Optimal Product Characteristics. *9th Pangborn Sensory Science Symposium*, Poster Session 2 Sensometrics, The Sheraton Centre Toronto Hotel, Toronto, Canada, 4-8 September.

Zalila, Z., Cuquemelle, J., Penet, C., Chikh, A., Lorentz, B., Deschamps, D., Assemat, C., Marbach, S., Gueydan, G.,

Leroux, C. (2008-2013) *Approche xtractis® pour la modélisation prédictive robuste et l'optimisation multi-objectifs de processus complexes*. White Paper, v3.2, décembre 2013, Intellitech, Compiègne, 18 p, <http://xtractis.ai/fr/approche-mathematique-algorithmique-unique/>

Zalila, Z., Gueydan, G., Cuquemelle, J. Lorentz, B. (2013) Why is robustness assessment mandatory for predictive modeling? Benchmark test of PLS and xtractis® approaches based on a study of sensory evaluation and consumer liking of automotive materials. *10th Pangborn Sensory Science Symposium*, Poster Session 2 – Category 5 Sensory and instrumental relationships, Windsor Barra Hotel, Rio de Janeiro, Brazil, 11-15 August.

Zalila, Z., Gueydan, G., Chikh, A., Mutel, F. (2014-2016) *xtractis® Études de cas publiques de Modélisation Prédictive Robuste par Intelligence Artificielle Floue Augmentée*, White Paper, v2.6.12, septembre 2016, Intellitech, Compiègne, 142p, <http://xtractis.ai/fr/etudes-de-cas-sur-open-data/>

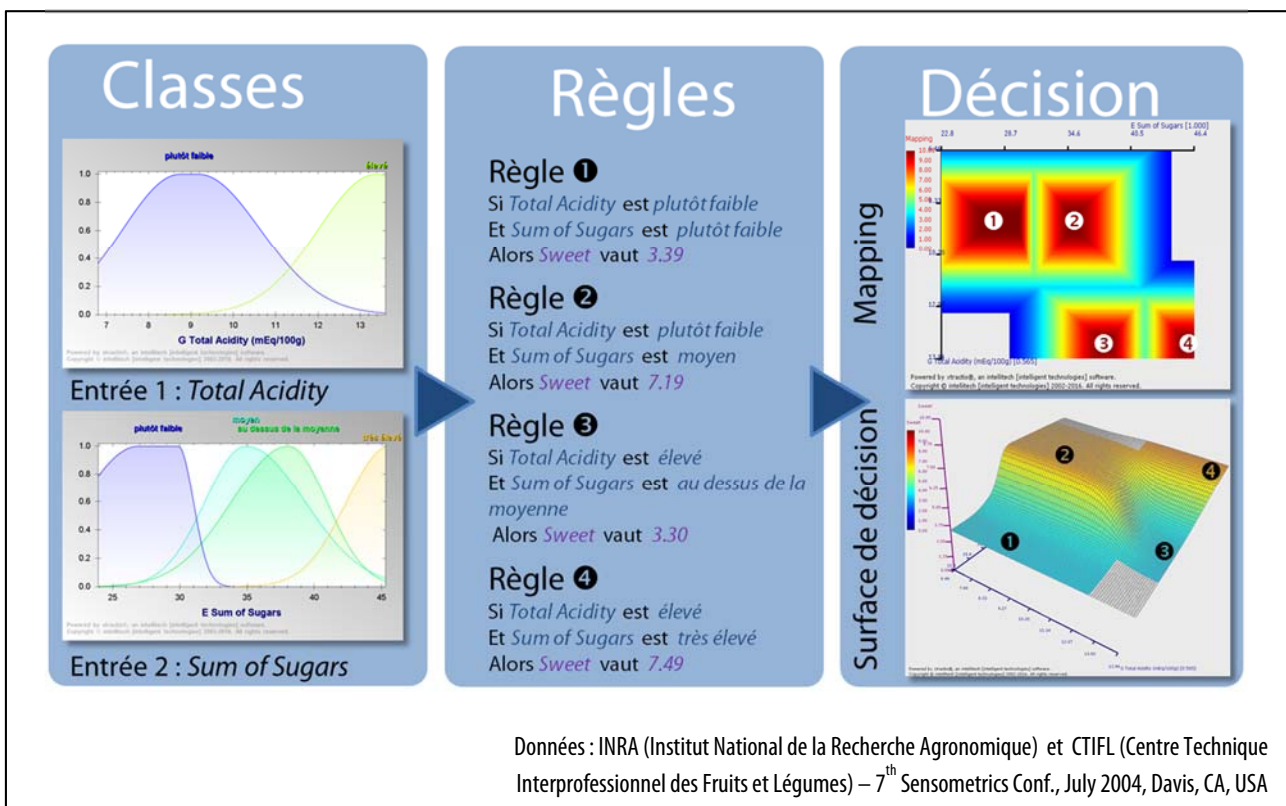


Figure 1 : Modélisation xtractis® (GENERATE 9.1.16325) de la perception sucrée d'une tomate fraîche : 2 variables prédictives, 4 règles décisionnelles.

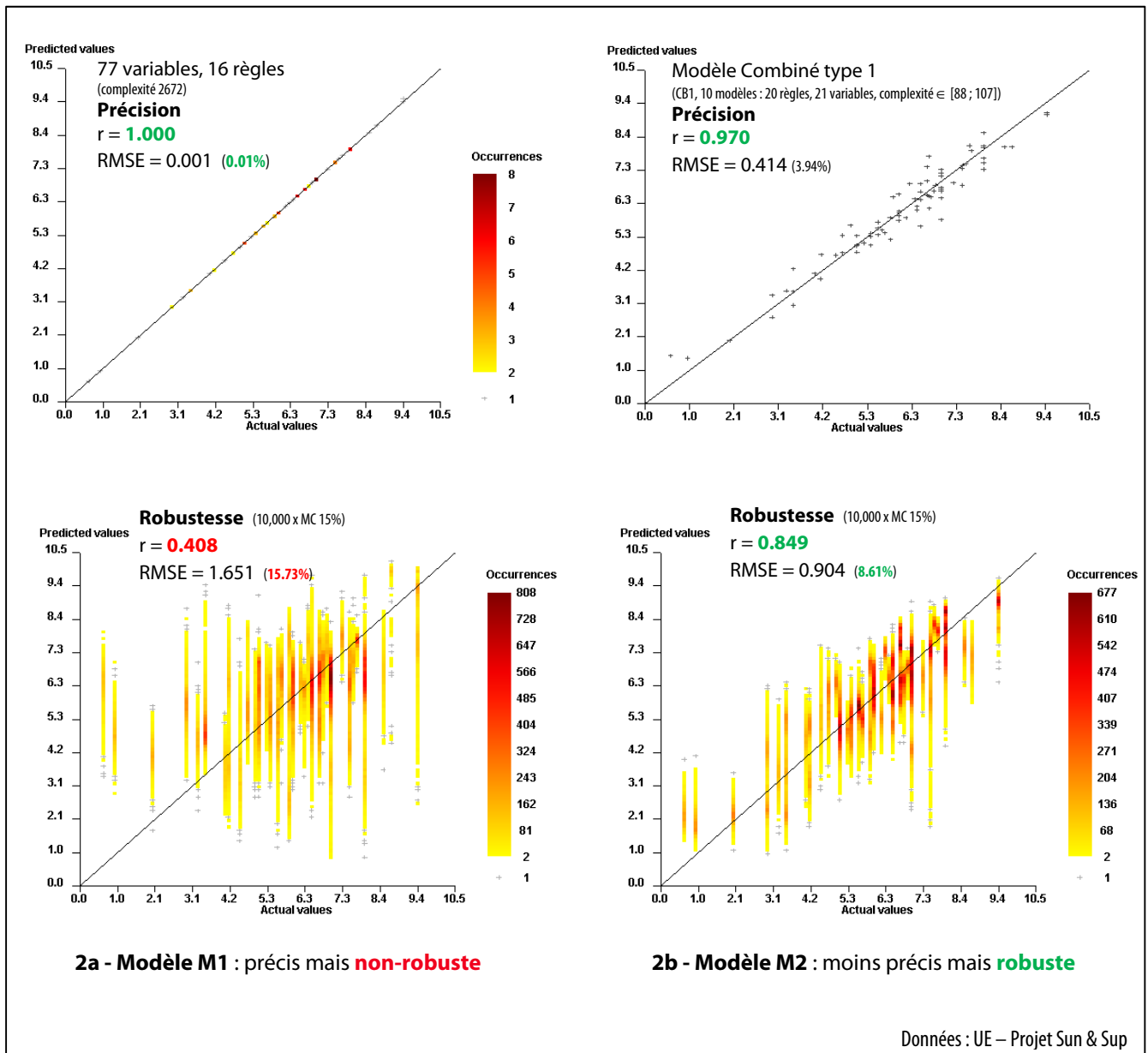


Figure 2 : Performances de deux modélisations xtractis® (GENERATE 9.1.16139) pour l'analyse de risque de survie d'une start-up technologique européenne.

		Actual class	
Decision		0	1
Predicted class	0	98.98%	4.78%
	1	1.02%	95.22%
	Non-mapped	0.41%	2.55%

Robustesse 1,000 x MC 15%

Rank	Var. ID	Label	Individual influence	Missing value
1	11	radius Cell 2	1	0,00%
2	22	texture Cell 3	0,436	0,00%
3	8	concave points Cell 1	0,274	0,00%
4	29	symmetry Cell 3	0,147	0,00%
5	23	perimeter Cell 3	0,12	0,00%
6	28	concave points Cell 3	0,105	0,00%
7	21	radius Cell 3	0,103	0,00%
8	15	smoothness Cell 2	0,078	0,00%
9	2	texture Cell 1	0,066	0,00%
10	16	compactness Cell 2	0,063	0,00%
11	1	radius Cell 1	0,052	0,00%
12	25	smoothness Cell 3	0,049	0,00%
13	12	texture Cell 2	0,046	0,00%
14	18	concave points Cell 2	0,045	0,00%
15	10	fractal dimension Cell 1	0,044	0,00%
16	24	area Cell 3	0,039	0,00%
17	3	perimeter Cell 1	0,039	0,00%
18	27	concavity Cell 3	0,033	0,00%
19	4	area Cell 1	0,025	0,00%
20	7	concavity Cell 1	0,022	0,00%
21	30	fractal dimension Cell 3	0,021	0,00%

Prédicteurs avec une faible influence individuelle

3a - Modélisation par approche holistique : 21 prédicteurs, 3 règles

		Actual class	
Decision		0	1
Predicted class	0	82.04%	22.46%
	1	17.96%	77.54%
	Non-mapped	0.88%	1.04%

Robustesse 1,000 x MC 15%

Individual influence

Rank	Var. ID	Label	Individual influence	Missing value
1	11	radius Cell 2	1,000	0,0 %
2	22	texture Cell 3	0,570	0,0 %

3b - Modélisation par approche cartésienne : 2 prédicteurs, 8 règles

Données : Dr. William H. Wolberg, W. Nick Street, Olvi L. Mangasarian – University of Wisconsin

Figure 3 : Diagnostic du cancer du sein par analyse d'images de cellules mammaires. Différences de robustesses des modélisations xtractis® (GENERATE 8.0.10349) : approches holistique et cartésienne.