



M. ASSOULINE
Clinique de la Vision – Groupe Visya, PARIS.
dr.assouline@gmail.com

De quoi aurons-nous besoin : intelligence disruptive, collective ou artificielle ?

La presse grand public déborde aujourd'hui des étonnantes opportunités liées à l'accélération de l'innovation technologique, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) et de sa contribution potentielle majeure aux futurs progrès médicaux.

30 années de participation à l'effort de recherche et développement (R&D) de notre discipline m'incitent à tenter de réfléchir à l'enchaînement causal des fantastiques progrès dont nous avons été régulièrement les témoins, et parfois les acteurs pour les plus motivés ou les plus chanceux.

En chirurgie ophtalmologique, notamment réfractive, comme dans l'industrie de pointe, un progrès n'arrive pas par hasard et rarement de façon isolée. À l'origine de chaque innovation déterminante, on trouve une combinaison variable d'intelligence disruptive et d'intelligence collective.

L'expansion récente de l'intelligence artificielle ouvre des perspectives inédites qu'il nous incombe d'appréhender rapidement pour accélérer l'amélioration du service médical rendu de notre spécialité et son rayonnement.

■ Intelligence disruptive

La majorité des innovations en ophtalmologie est née de la confrontation d'un praticien avec une situation clinique non résolue.

Cela a été le cas des implants intraoculaires (Ridley), du laser rétinien (Meyer-Schwickerath), de la vitrectomie (Machemer/Parel), de la phacoémulsification (Kelman), de la capsulotomie au laser YAG (Aron-Rosa), de la PKR au laser excimer (Trokel), des implants multifocaux diffractifs (Isaacson), du Lasik (Pallikaris/Burratto), du PresbyLasik (Chaubard/

Ghenassia), du laser femtoseconde (Juhasz) des anti-VEGF pour la DMLA (Rosenfeld)...

Bien évidemment, les principes physiques et techniques utilisés dans ces innovations ont été l'aboutissement d'une longue chaîne de progrès scientifiques collectifs, mais c'est l'intuition puis la détermination obstinée d'un individu qui ont contribué le plus souvent à imposer une méthode nouvelle, au détriment des précédentes, rendues ainsi obsolètes.

Très souvent, l'intelligence collective doit donc être bousculée et catalysée par une contribution plus individuelle et aléatoire d'intelligence disruptive.

Le *quantum leap* et le *paradigm shift* anglo-saxons traduisent l'éclair de lucidité individuel ("eurêka", " $E = mc^2$ ") ou l'aboutissement d'une voie alternative, solitaire et étroite par laquelle les règles et les traditions normatives de la connaissance sont remises en cause, afin d'ouvrir une réflexion nouvelle, plus juste, plus efficace ou plus inclusive.

Cette capacité de certains à concevoir l'innovation en dehors des schémas établis et reproduits par le grand nombre traduit autant l'aptitude individuelle (le "génie" mathématique ou créatif, la volonté d'affronter les paradoxes dont la majorité s'accommode, la capacité d'observer et de penser par soi-même *out of the box*) que des variations de configurations sociétales particulières et souvent stéréotypées favorisant une forme utile de rébellion intellectuelle. Pour caricaturer, le phénotype de "l'innovateur disruptif" sera plus volontiers gaucher, deuxième de sa fratrie, issu d'une minorité, porteur d'un handicap et ayant bénéficié d'un système éducatif et social trop (ou parfois trop peu) normatif...

En chirurgie, la méfiance collective naturelle qui accompagne l'émergence d'une idée nouvelle contribue à un affrontement

formel salubre et à un arbitrage par les pairs (*peer review*), gage d'une acceptation fondée sur une évaluation contradictoire plutôt que sur la séduction de la nouveauté.

Le chemin est souvent fastidieux. L'idée disruptive du PresbyLasik multifocal ou des implants asphériques multifocaux, selon laquelle une majoration des aberrations optiques d'ordre supérieur contribue à améliorer la profondeur de champ tout en préservant une qualité de vision raisonnable, a mis plus de 20 ans à s'imposer. Le partage de la lumière par les implants diffractifs génère depuis 30 ans la même suspicion. Les implants phasiques de chambre postérieure, solution élégante, efficace et sûre pour la correction des fortes myopies, ne sont utilisés que par une minorité de chirurgiens après 25 ans d'expérience et près de 1 million de cas traités.

■ Intelligence collective

L'innovation technique s'accélère depuis le Néolithique, de façon récemment exponentielle du fait du partage de l'information et de l'intelligence collective construite par l'organisation sociale. La démographie, l'éducation et les moyens de diffusion plus performants permettent l'accumulation, la transmission, le partage ainsi que la confrontation plus ouverte et méthodique des concepts et des connaissances.

Dans notre spécialité très dynamique, la récurrence élevée des événements d'échanges et de formation postuniversitaires locaux ou internationaux est le moteur principal de l'évolution de nos pratiques professionnelles, qui équilibre le besoin de se démarquer par l'innovation concurrentielle (émulation) et la prudence de ne pas s'exposer au risque médico-légal sous-tendu par la position collégiale (consensus).

L'intelligence collective est particulièrement apte à mettre en œuvre des progrès incrémentaux basés sur le recueil minutieux des données et la fiabilité de leur analyse.

Le *kaizen* japonais (littéralement le "changement meilleur") est un processus d'amélioration continue largement adopté par l'industrie, fondé sur des actions concrètes, simples et peu coûteuses, et sur un état d'esprit qui nécessite l'implication de tous les acteurs.

Cette dynamique collective du progrès bénéficie avant tout d'une arborescence séquentielle des tâches. Classiquement, la science fondamentale (exemple: l'optique ondulatoire

et quantique) ouvre la voie de la recherche translationnelle (optique ultrarapide), laquelle alimente régulièrement le pipeline de l'innovation technique pour la R&D commerciale applicative (laser femtoseconde), dont s'emparent rapidement les utilisateurs (femto-Lasik, Smile...) au bénéfice des consommateurs (les patients) et des investisseurs avisés (les fonds de pension).

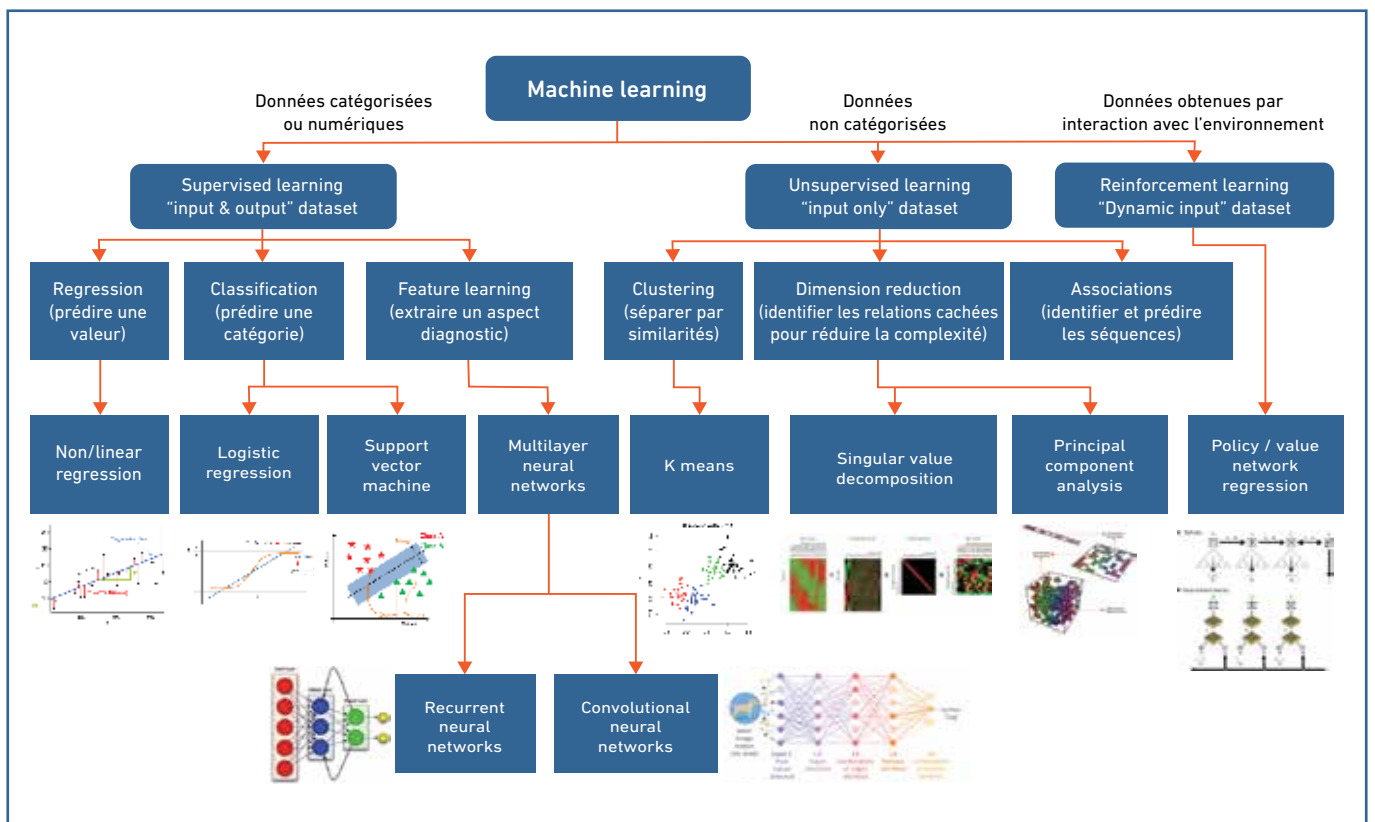
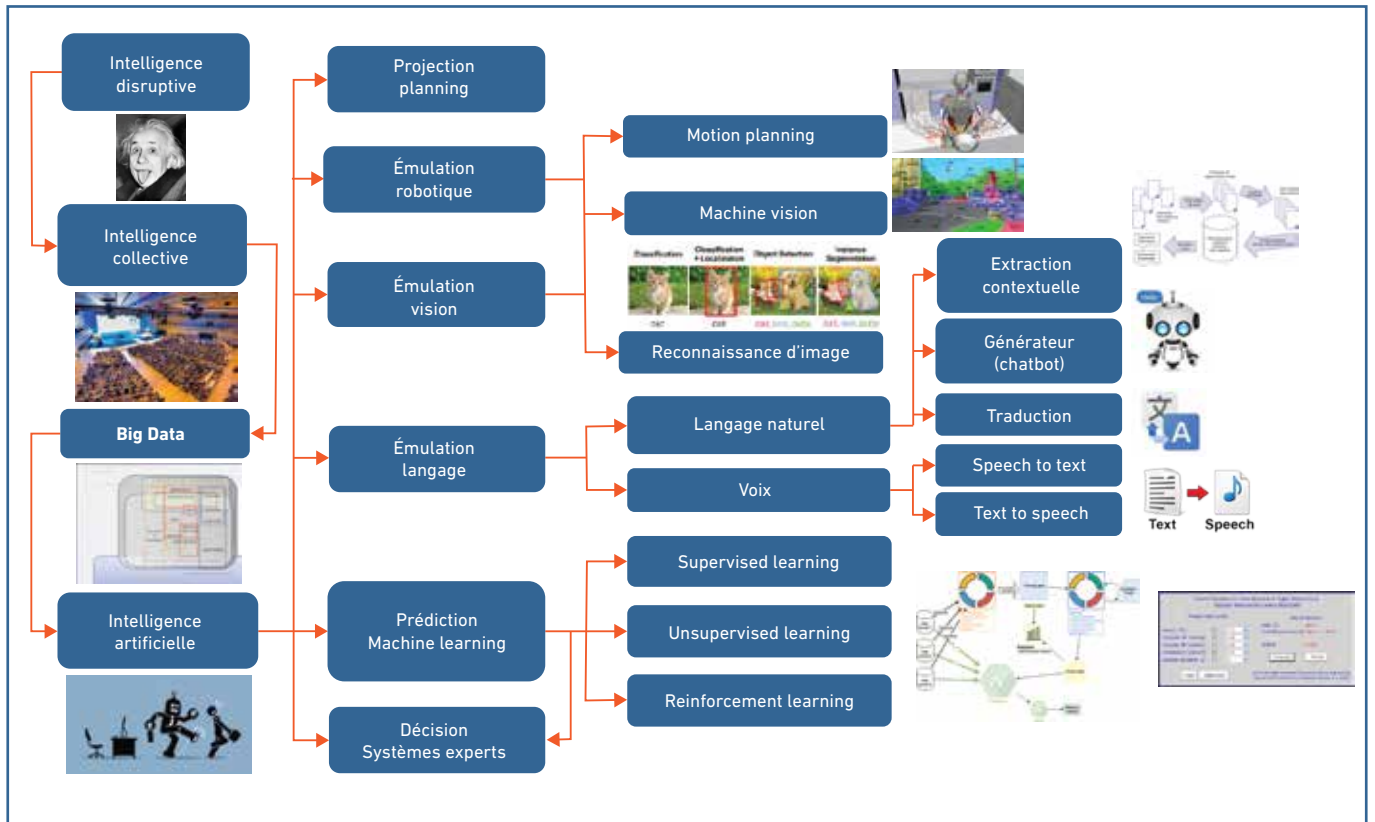
L'intelligence collective prospère également du fait d'une diversification transversale importante. De nombreuses équipes confrontées à la même problématique appliquent des méthodes d'investigation qui diffèrent selon leur culture ambiante, leur domaine d'expertise et la personnalité de leurs membres. Plusieurs solutions concurrentes (ou parfois étrangement similaires) peuvent émerger. Le champ actuel d'investigation des implants accommodatifs témoigne de cette riche diversité créatrice.

Dans le monde contemporain, les systèmes collectifs de protection de la propriété intellectuelle garantissent un stimulus puissant en faveur de l'innovation, favorisée par le fait qu'une idée préemptée par un brevet contraint immédiatement les autres chercheurs à explorer les autres voies disponibles.

Les principes rigoureux de l'édition scientifique validée par des pairs offrent un modèle incomparable de promotion d'une forme de vérité consensuelle qui sert de socle solide, mais contraignant, à l'évolution des idées. C'est l'acuité pertinente de ce système qui nous a conduit à délaisser des techniques pourtant jugées initialement efficaces (la KR, l'Intracor, les implants accommodatifs, les *inlays* intrastromaux, la femto-chirurgie de la cataracte) ou à réhabiliter des méthodes qui paraissaient "déclassées" (la PKR, les greffes lamellaires).

C'est également la rigueur méthodologique des outils modernes de santé publique qui nous permettent d'arbitrer l'adoption des techniques chirurgicales en devenir (Smile vs Lasik, PresbyLasik vs implants multifocaux, segments intracornéens vs *cross-linking*, DMEK vs DSAEK vs greffe transfixiante, par exemple) Les études longitudinales ou prospectives anglo-saxonnes et les "registres" épidémiologiques nationaux australiens ou suédois en sont les meilleurs exemples.

Dans le domaine de l'évaluation subjective (symptomatologie, souffrance, qualité de vision, qualité de vie), la montée en puissance des questionnaires validés collectivement par une méthodologie précise permet de corrélérer la pertinence du diagnostic ou la qualité du service médical rendu aux données



médicales objectives. Le questionnaire collaboratif sur le kératocône mis en œuvre par notre ami le Pr David Touboul est un bon exemple de cette démarche.

La connectivité accrue des acteurs, la mise en ligne de logiciens experts, les réseaux interdisciplinaires et transnationaux, les centres d'excellence, les partenariats public-privé, le *crowdsourcing*, les plateformes de collaboration en ligne sont autant de formes nouvelles de l'intelligence collective favorisée par la digitalisation de l'information. Dans notre spécialité, chaque praticien peut par exemple bénéficier de la somme considérable de travail collectif matérialisée par les sites de calcul biométrique postréfractif de l'ASCRES (www.iolcalc.com) ou de calcul des corrections toriques résiduelles (www.astigmatismfix.com).

La rigueur de l'information scientifique contraste avec la "souplesse" de l'information plus subjective diffusée par les médias grand public ou les réseaux sociaux, et l'inquiétante dissémination des opinions infondées ou des *fake news* manipulatrices. Le décalage de ces deux systèmes d'information est flagrant dans notre spécialité en ce qui concerne l'adoption de la chirurgie réfractive. Par exemple, le taux de chirurgiens réfractifs s'étant fait eux-mêmes opérer (27 % dans une étude récente) est, selon les pays, 10 à 20 fois plus élevé que celui de la population générale (3,7 % aux États-Unis, 1,18 % en Europe). Cependant, la grande majorité des patients, des journalistes et des ophtalmologistes eux-mêmes demeurent convaincus du contraire !

Les limites actuelles de l'intelligence collective, dont le potentiel paraît infini, sont précisément celles qui fondent la nécessité d'une intelligence disruptive : le manque de vision anticipatrice et la faible implication des acteurs concernés.

L'individualisme médical et l'absence de motivation administrative sont toujours aujourd'hui des freins puissants à la dynamique si efficace des *data sciences*, notamment dans les pays latins à moins forte pression sociétale et à faible exigence procédurale.

Par manque de moyens techniques, et surtout de volonté, nous laissons très largement inexploitée l'information utile recelée dans nos bases de données cliniques. Nous avons par exemple tiré assez peu d'enseignements des 100 000 yeux opérés en 20 ans (26 000 sur les 4 dernières années) à la Clinique de la Vision — Paris. Nous ne savons pas réellement préconiser un Lasik ou une PKR autrement que sur la base de notre intuition éclairée de cliniciens expérimentés,

alors que nous pourrions sans doute disposer d'un arbitrage scientifique plus objectif.

De même, nous disposons en théorie aujourd'hui de toutes les données cliniques quantitatives nécessaires pour déterminer si la chirurgie cristallinienne contemporaine présente un risque rhéptomogène majoré avant 55 ans, mais d'aucune étude pertinente pour recommander un Lasik ou un Prelex autrement que sur la base de notre préférence personnelle.

L'exemple spécifique du kératocône, pour lequel les stratégies thérapeutiques sont encore largement subjectives, est tout aussi révélateur. En 12 ans, la Clinique de la Vision — Paris est devenue le premier centre français du traitement chirurgical du kératocône. Cependant, l'impressionnante cohorte de près de 1 800 cas traités au cours des seules 4 dernières années, qui correspond sur le plan épidémiologique à une population de plusieurs millions d'habitants, n'a pour l'instant fait l'objet d'aucune analyse statistique rétrospective ou prospective globale. De ce fait, le choix entre segments intracornéens, *cross-linking* et *topolink* relève plus d'une conviction individuelle que d'une démonstration scientifique. De façon caricaturale, l'intervention pourtant assez univoque de "mise en place de segments intracornéens" est libellée dans notre base de données médicales (*Electronic medical record*, EMR) sous 46 dénominations et orthographes différentes, un sérieux handicap pour toute tentative de recherche clinique en temps réel ou différée.

L'interprétation des données cliniques recueillies est affectée par de nombreux biais dont il est difficile de s'affranchir malgré les méthodes fastidieuses de randomisation prospective. Planifier une comparaison révèle un préjugé d'interprétation qui conduit à privilégier le recueil de certaines données jugées utiles au détriment d'autres variables.

La mise en commun de très grands nombres d'observations n'est pas toujours suffisante. L'analyse mathématique conventionnelle (analyse de variance, modèles de régression) n'est pas assez efficace pour déceler ou démontrer des corrélations utiles ou pour prédire les résultats d'un processus complexe. Par exemple, la prédictibilité de la réfraction postopératoire après chirurgie cristallinienne (environ 45 à 75 % de cas à $\pm 0,50$ D de l'objectif), fondée sur le calcul biométrique théorique ou empirique, est très inférieure à celle de la chirurgie réfractive au laser (environ 98 % à $\pm 0,50$ D). La position effective de l'implant (ELP pour *Effective Lens Position*) dépend de facteurs trop nombreux (variables indépendantes telles que la longueur axiale, la profondeur de la

chambre antérieure, le diamètre cornéen, la géométrie dynamique de l'implant après contraction du sac capsulaire) pour pouvoir affiner valablement le modèle de régression ou les formules de vergence prédictifs.

■ Intelligence artificielle

La loi de Gordon Moore (1965) prédisait que la puissance de calcul des processeurs doublerait tous les deux ans. De fait, l'iPhone en 2018 est plus puissant que l'ordinateur de la conquête de la Lune utilisé par la Nasa. Le supercalculateur le plus rapide atteint actuellement 100 à 200 pétaflops ($2 \cdot 10^{17}$ opérations logiques par seconde). Les serveurs commerciaux actuels (ex : Nvidia Tesla K80 GPU 9 téraflopps, soit 10^{13}) sont aussi performants que les supercalculateurs de 2008. La puissance de calcul brute du cerveau humain est quant à elle restée stable depuis 30000 ans (10^{11} neurones commutant 100 fois par seconde, soit 10^{13} opérations logiques par seconde).

Nos capacités cérébrales originelles sont immenses, mais pourtant assez limitées dans certains domaines. Si les études supérieures nous ont appris à absorber facilement l'information d'un graphique à 2 dimensions, il reste assez difficile pour un médecin d'intégrer rapidement la signification d'un graphique à 3 ou 4 dimensions (prenant en compte, par exemple, 2 facteurs de risque et le temps).

L'approche mathématique classique de l'étude de l'impact d'un ou plusieurs facteurs de risque (ou variables indépendantes) sur le résultat d'une intervention (variable dépendante) est également très rapidement limitée au-delà de 4 variables. L'IA devrait permettre de nous affranchir de ces barrières pour offrir une compréhension plus approfondie des réalités complexes, détachée de nos *a priori* culturels humains et sans limitation du nombre de variables prises en compte pour le "raisonnement".

Les réseaux neuronaux, apparus vers 1960, sont des ensembles d'unités mathématiques organisées en couches successives. Chaque unité traite les données numériques entrantes pour les redonner sous forme d'une transformation logique à la couche suivante. Les filtres logiques successifs permettent d'identifier des corrélations qui échappent au jugement humain lorsque celui est porté sur les données de départ.

L'apprentissage profond (*deep learning*, *deep structured learning*, *hierarchical learning*) est l'une des ces approches

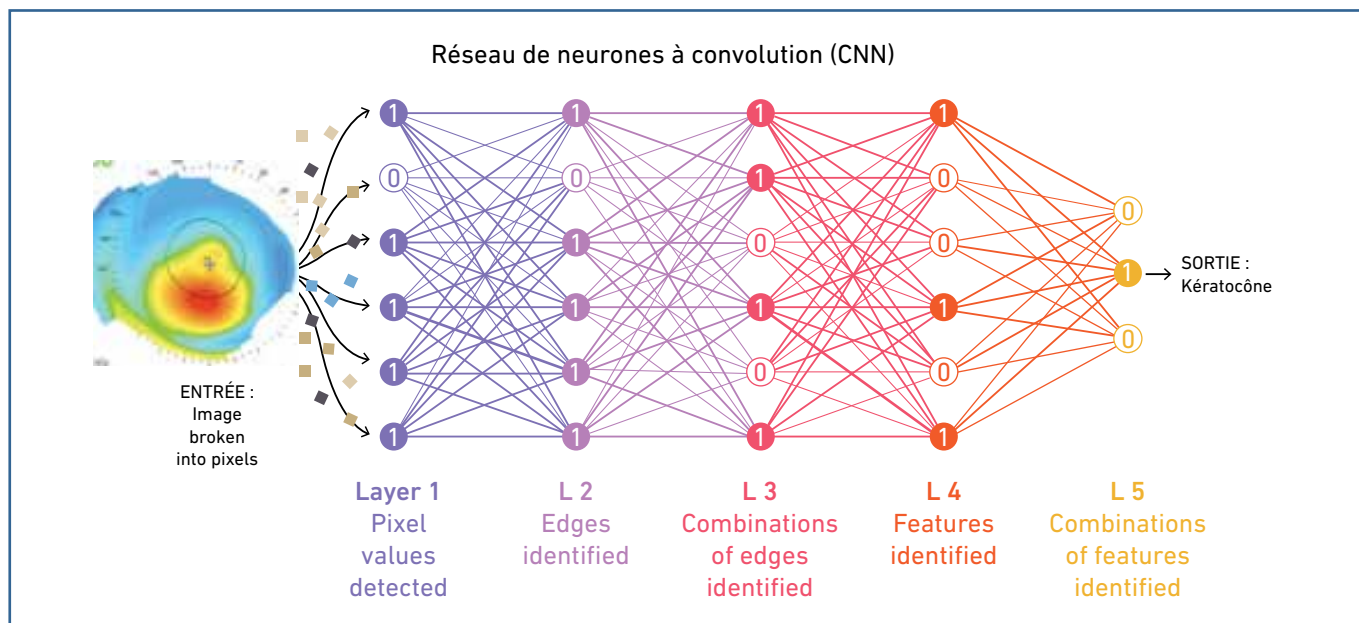
d'apprentissage automatique basée sur la modélisation et la transformation non linéaire des données abstraites constituant une information (par exemple, les vecteurs des pixels formant une image, ou des voxels sur un OCT). La recherche en *deep learning*, soutenue par des investissements massifs des Gafa (Google, Apple, Facebook, Amazon) et d'IBM (projets DeepMind, Google, Watson-IBM...), a révolutionné des domaines comme la reconnaissance faciale ou vocale, la vision par ordinateur, ou le traitement du langage.

Le développement de la puissance de calcul informatique, de stockage, de l'algorithmique et de la connectivité a permis à des logiciels de *deep learning* de dépasser des capacités cognitives typiques de l'intelligence humaine (jeu d'échecs 1997, jeu de go 2016, poker 2017, reconnaissance faciale et vocale, composition de poèmes ou de musique, peinture à la manière de Van Gogh, traduction, lecture sur les lèvres, reconnaissance des émotions, identification faciale du genre...).

La capacité de l'IA à traiter un grand volume d'informations pour prédire un événement en apparence aléatoire semble stupéfiante (prédiction des émeutes à 5 jours, des tempêtes à 15 jours, des épidémies de choléra à 1 mois, des décisions de la Cour de justice de l'Union européenne avec 79 % de précision...).

Les réseaux neuronaux convolutionnels (CNN, pour *convolutional neural networks*) sont les mieux adaptés pour l'analyse d'image automatisée à visée diagnostique. Les CNN apprennent par répétition et autocorrection en analysant une collection d'images qualifiées par des experts humains (*training set*). L'algorithme ajuste ses paramètres pour réduire son taux d'erreur à chaque nouvel essai jusqu'à être en accord avec la classification humaine puis il est testé sur une collection non qualifiée (*validation set*). L'IA ne comporte aucun jugement sur les lésions élémentaires et l'algorithme détermine seul les régions d'intérêt spécifique, qu'il peut éventuellement révéler (fonction *Show me where*). La performance est mesurée par la relation entre sensibilité et spécificité (surface sous la courbe ROC ou ROC-AUC) afin d'éviter de tenir compte des seuils choisis arbitrairement. Une AUC de 0,5 correspond à un diagnostic automatisé porté au hasard, tandis qu'une valeur de 1 indique une sensibilité et une spécificité maximales.

L'application des méthodes de l'IA au diagnostic de l'imagerie médicale permet d'extraire de très grandes quantités d'informations utiles, en un temps limité et avec très peu d'interférence humaine.



Un programme d'IA a dépisté 52 % des cas de cancer du sein à partir de mammographies jusqu'à un an avant le diagnostic humain classique.

Les programmes actuels de détection automatisée de la rétinopathie diabétique modérée montrent une sensibilité de 0,97 et une spécificité de 0,92 avec une AUC de 0,986 – comparée au diagnostic par un collègue d'ophtalmologistes qualifiés de sensibilité 0,83 et spécificité 0,98 (Krause, 2018). Ces programmes paraissent plus aptes à se “concentrer” sur les détails subtils qui échappent aux observateurs humains (micro-anévrysmes et micro-hémorragies) et à ignorer les artefacts (reflets, corps flottants).

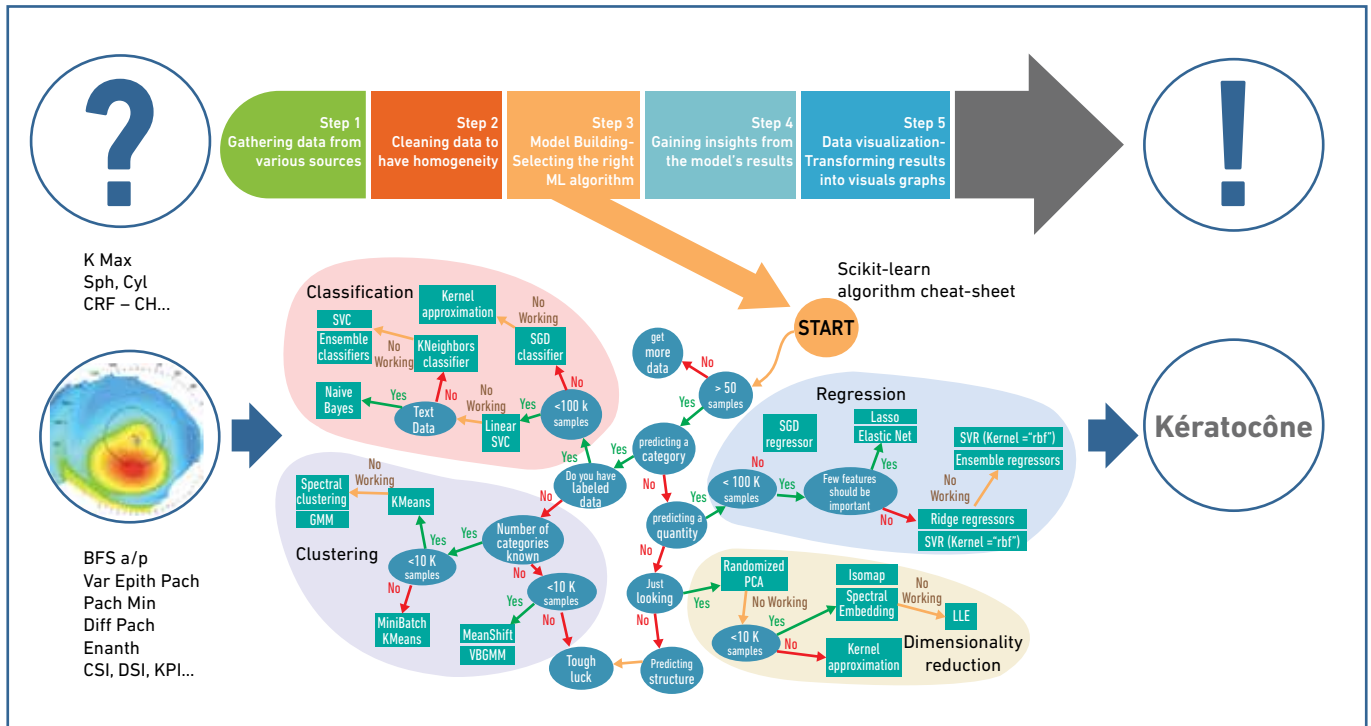
L'analyse des rétino-graphies par IA, éventuellement combinée à celle de l'OCT, permet de dépister également le risque cardiovasculaire, la DMLA, l'occlusion veineuse, la rétinopathie des prématurés et le glaucome, avec des sensibilités variant de 63 à 91 %.

L'utilisation de l'IA pour la chirurgie du segment antérieur est moins avancée, mais non moins prometteuse. Notamment pour l'identito-vigilance (reconnaissance faciale, irienne et vocale), pour la détermination de la réfraction subjective optimale basée sur la convergence de la réfractométrie, de la topographie et de l'aberrométrie, pour le diagnostic automatisé du kératocône, des images d'OCT du segment antérieur, de l'échographie oculaire, de la cataracte par polarimétrie, et pour améliorer la prédictibilité du calcul biométrique des implants intraoculaires.

Le calcul de l'implant intraoculaire est un bon exemple de ce que peut apporter une approche par intelligence artificielle. Intuitivement, un chirurgien expérimenté recommandera d'utiliser plutôt la formule de Holladay II pour les globes très courts et la SRK-T pour les globes longs. Mais il conseillera de l'éviter si la kératométrie est irrégulière. Dans ce cas, il choisira plutôt la kératométrie la plus basse dans la zone centrale et préférera la formule de Haigis pour les chambres antérieures de profondeur inhabituelle, etc.

Trois approches mathématiques classiques font encore concurrence à l'IA, mais se révèlent insuffisantes pour prédire la position effective de l'implant (ELP) qui affecte la précision de la réfraction postopératoire. Les formules de régression suivies des formules théoriques de 3^e génération (SRK-T, Holladay I, Hoffer Q) sont moins performantes pour les longueurs axiales extrêmes. Les formules de vergence comme la formule de Barrett Universal II semblent plus adaptées aux yeux très longs (> 25,5 mm) et très courts (< 22 mm), mais elles sont prises en défaut par les yeux irréguliers. L'approche par *Ray Tracing* (modélisation optique des 4 interfaces cornéennes et pseudo-cristalliniennes, de l'asphéricité cornéenne et de l'astigmatisme irrégulier) est mieux adaptée aux yeux préalablement opérés ou atteints d'une pathologie cornéenne, en revanche elle peine à prédire l'ELP.

En définitive, l'approche par intelligence artificielle semble plus prometteuse car elle prend en compte des paramètres préopératoires plus variés (diamètre de la cornée, profondeur de chambre antérieure, épaisseur du cristallin, âge,



sexe et ethnique, par exemple). La méthode RBF (*Radial Basis Function*), développée par un collectif de 40 experts conduit par Warren Hill, augmente la proportion d'yeux à $\pm 0,50$ D de l'emmétropie à près de 82 %. D'autres approches d'IA (méthode FullMonte, fondée sur l'algorithme de Monte-Carlo Markov, méthode Ladas Super 2.0 prédisant le déplacement minime de l'implant par rapport à la position théorique qui caractérise sa constante A) sont en cours d'évaluation.

>>> D'autres applications de l'IA sont envisagées :

- Chatbots (robots conversationnels), pour identifier des associations symptomatiques et anamnestiques caractéristiques chez les patients ;
- investigation des associations pathologiques par corrélations ouvertes (*clustering*). Par exemple, pour l'identification précoce des liens épidémiologiques latents (pachymétrie/glaucome, petite papille/NOIAA, vaccin anti-hépatite B et NORB, Lasik et ectasie, implant phaque et cataracte, hypermétropie et œdème maculaire...).

>>> Les limites de l'IA à visée diagnostique commencent cependant à être identifiées :

- la qualité de la validation médicale des images qualifiées de référence est essentielle. Il est très difficile de s'en assurer sur les larges quantités d'images requises par le processus ;
- la qualité des images acquises dans la vie réelle est également critique. Les méthodes d'IA ont besoin de gagner en

robustesse pour s'adapter aux images de qualité moyenne obtenues en routine ;

- l'interprétation de l'image par l'algorithme relève d'un processus "opaque" qualifié de *black box* par les experts. Il ne peut donc être ni breveté ni contrôlé facilement en pratique par l'expertise humaine. En matière d'IA, comme pour les ressources humaines, "la confiance n'exclut pas le contrôle".

■ Conclusion

L'intelligence collective au service du progrès médical suppose donc une vision directrice (anticipation) et une démarche cohérente, coordonnée et disciplinée (exécution) de l'ensemble des acteurs pour produire des résultats tangibles. La puissance de l'intelligence collective ne devrait pas exclure un certain niveau de tolérance attentive pour laisser s'exprimer les rares et précieuses percées de l'intelligence disruptive. Les méthodes de l'intelligence artificielle, détachée de toute inférence humaine et des contingences de l'échantillonnage statistique traditionnel, capables de brasser des volumes de données très importants (Big Data), devraient permettre de rendre les *data sciences* plus accessibles, transparentes et efficaces pour les acteurs et les bénéficiaires de la chirurgie oculaire et réfractive. L'automatisation actuelle de certains processus spécifiques (imagerie diagnostique, identito-vigilance, robotique, calcul et simulation numérique) n'est

donc que l'un des aspects de l'IA pour l'avenir de notre métier.

La création d'intelligence médicale par le rapprochement analytique intensif des informations individuelles et collectives (cliniques, paracliniques et génétiques) devrait impacter en profondeur nos conceptions médicales en identifiant de nouveaux biomarqueurs et associations syndromiques qui ont jusqu'ici échappé à la sagacité des chercheurs et en renforçant notre capacité prédictive. Dans la pratique quotidienne, à mesure qu'augmente le volume de données utiles, le praticien aura de plus en plus de mal à rivaliser avec l'IA pour prendre des décisions pertinentes en temps réel.

C'est donc vers cet objectif d'aide à la décision et vers cet idéal de praticien "cérébral augmenté" que doivent tendre nos efforts, en espérant que la sensibilité, l'empathie, le don de soi, l'intégrité et le respect de l'autre, qui sont l'essence de notre fonction, resteront l'apanage de notre humanité.

Pour en savoir plus

- LLAURENS V, RAYMOND M, FAURIE C. Why are some people left-handed? An evolutionary perspective. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2009;364:881-894.
- SNIDERMAN B. The five personalities of innovators. Forbes Insights, Custom research division of Forbes Media 2012.

- DU XL, LI WB, HU BJ. Application of artificial intelligence in ophthalmology. *Int J Ophthalmol*, 2018;11:1555-1561.
- KRAUSE J, GULSHAN V, RAHIMY G *et al.* Grader variability and the importance of reference standards for evaluating machine learning models for diabetic retinopathy. *Ophthalmol*, 2018;125:1264-1272.
- RAMAN R, SRINIVASAN S, VIRMANI S. Fundus photograph-based deep learning algorithms in detecting diabetic retinopathy. *Eye*, 2019;33:97-109.
- POPLIN R, VARADARAJAN AV, BLUMER K *et al.* Prediction of cardiovascular risk factors from retinal fundus photographs via deep learning. *Nat Biomed Eng*, 2018;2:158-164.
- MUHAMMAD H, FUCHS TJ, DE CUIR N *et al.* Hybrid deep learning on single wide-field optical coherence tomography scans accurately classifies glaucoma suspects. *J Glaucoma*, 2017;26:1086-1094.
- SIDDIQUI AA, DEVGAN U. Intraocular lens calculations in atypical eyes. *Indian J Ophthalmol*, 2017;65:1289-1293.
- AMBRÓSIO R JR, LOPES BT, FARIA-CORREIA F *et al.* Integration of Scheimpflug-based corneal tomography and biomechanical assessments for enhancing ectasia detection. *J Refract Surg*, 2017;33:434-443.
- MALABOU C. *Métamorphoses de l'intelligence : que faire de leur cerveau bleu?* PUF, 2017.
- ALEXANDRE L. *La Guerre des Intelligences*. JC Lattes, 2018.
- HARARI YN. *21 leçons pour le XXI^e siècle*. Éd. Albin Michel, 2018.

L'auteur a déclaré ne pas avoir de conflits d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.