

Le workflow numérique au service de l'apprentissage clinique du praticien

Masrour MAKAREMI^{1*}, François de BRONDEAU¹, Camille LACAULE¹, Pierre BOULETREAU²

¹Département d'orthopédie dento-faciale, UFR des sciences odontologiques, 146 rue Léo Saignat, 33076 Bordeaux cedex

²Centre hospitalier Lyon Sud, 165 chemin de Grand Revoyet, 69310 Pierre Bénite

MOTS CLÉS :

Flux de travail numérique / Apprentissage clinique / Diagnostic / Planification thérapeutique / CFAO / Suivi thérapeutique

KEYWORDS :

Digital Workflow / Clinical learning / Diagnosis / Treatment Planning / CAD-CAM / Therapeutic follow-up

Résumé – Notre rapport aux technologies numériques et digitales aura un poids déterminant dans la construction de notre identité d'orthodontistes du 21^e siècle. Le workflow numérique utilisé en orthodontie peut être résumé en quatre phases successives : le diagnostic, la planification, la fabrication de l'outil thérapeutique sur mesure et le suivi thérapeutique. D'après le professeur Stanislas Dehaene, les neurosciences cognitives ont identifié quatre piliers dont dépend la réussite d'un apprentissage : l'attention, l'engagement actif, le retour d'information et la consolidation. Notre article essaiera de démontrer qu'une bonne organisation du workflow numérique, pensée en amont et cohérente, permet au praticien de renforcer son apprentissage à partir de chaque cas clinique traité en potentialisant les quatre piliers de l'apprentissage. Cette conception s'inscrit dans une stratégie d'augmentation.

Abstract – Our relationship to digital technologies will be a determining factor in building our identity as 21st century orthodontists. The digital workflow used in orthodontics can be summarized in four successive phases : diagnosis, treatment planning, computer Aid Manufacturing, therapeutic follow-up. According to Professor Stanislas Dehaene, cognitive neuroscience has identified four criteria on which learning success depends. Attention, active engagement, feedback and consolidation. Our article will try to demonstrate that a good organization of the digital workflow, thought upstream and coherent, allows the practitioner to strengthen his learning from each treated clinical case by potentiating the four criteria of learning. This is part of an increase strategy.

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, nos habitudes ont été bouleversées par la naissance de l'orthodontie numérique et digitale. L'avènement de l'imagerie, des empreintes tridimensionnelles, l'expression de l'intelligence artificielle à travers les algorithmes de décision thérapeutique (par exemple : set-up virtuel dynamique) et le développement des procédés de fabrication individualisée des appareils orthodontiques (CFAO : « Conception et fabrication assistées par ordinateur ») génèrent de profondes mutations. Celles-ci interviennent dans un contexte de transformation de la pratique médicale au-delà duquel c'est toute la société que nous voyons se métamorphoser au contact des nouvelles technologies numériques⁶.

L'impact de cette révolution numérique et digitale sur notre prise en charge des thérapeutiques orthodontiques est l'objet d'un riche débat¹⁷.

Un point clé dans cette mutation est la place et l'identité du praticien : aura-t-il la maîtrise du workflow numérique ou sera-t-il plutôt un fournisseur ?

Si l'objectif est une stratégie d'augmentation valorisant la place du praticien, le défi décisif pour sa réussite est de parvenir à donner la maîtrise de l'outil numérique aux praticiens, tout en les faisant progresser cliniquement au contact de l'outil numérique.

L'objectif de cet article est de démontrer que, si le workflow numérique a été suffisamment bien organisé et structuré en s'appuyant sur les théories issues des neurosciences cognitives, il peut devenir un formidable outil optimisant l'apprentissage et l'expérience clinique du praticien, lui assurant une progression tout au long de sa carrière, au fur et à mesure des cas auxquels il sera confronté.

* Correspondance : <masrour@makaremi.fr>

2. Décryptage du workflow numérique

L'interaction entre l'outil numérique et le processus thérapeutique peut être présentée en quatre étapes successives : le diagnostic, la planification thérapeutique, la fabrication de l'outil thérapeutique sur mesure et le suivi thérapeutique (Fig. 1).

2.1. Le diagnostic

Les progrès de l'imagerie maxillo-faciale grâce au « cone-beam grand champ », au scanner intra-oral et à la photographie 3D permettent de voir à travers les tissus, de mesurer des distances et d'avoir une vue d'ensemble du patient. De plus en plus précise et interactive, cette imagerie rend possible une vision plus transparente du patient. Nous voyons également se développer les premières applications basées sur l'intelligence artificielle, qui permettent par exemple d'effectuer des tracés céphalométriques directement sur la téléradiographie de profil sans intervention du praticien^{18,21}, allégeant la charge cognitive induite par ce travail fastidieux.

2.2. Planification thérapeutique

L'augmentation de la puissance de calcul des processeurs permet aux outils numériques de stimuler les objectifs thérapeutiques. Le set-up virtuel dynamique en est l'illustration parfaite : il permet d'obtenir une modélisation des objectifs thérapeutiques en 3D¹³. Il existe deux procédés de construction du set-up : soit on envoie les empreintes avec des instructions à un laboratoire chargé de présenter un set-up virtuel dynamique sur lequel le praticien peut également agir (Clean Check®, Insignia®), soit on procède à la construction du set-up directement à partir de logiciels (3 Shape®, Sky Plan®).

Le set-up virtuel dynamique est un précieux outil de visualisation des mouvements orthodontiques, de leur faisabilité, ainsi que de la biomécanique à mettre en place pour atteindre les objectifs thérapeutiques. Il constitue également un outil efficace d'explication et de dialogue avec le patient afin d'obtenir son adhésion et son implication dans le protocole orthodontique.

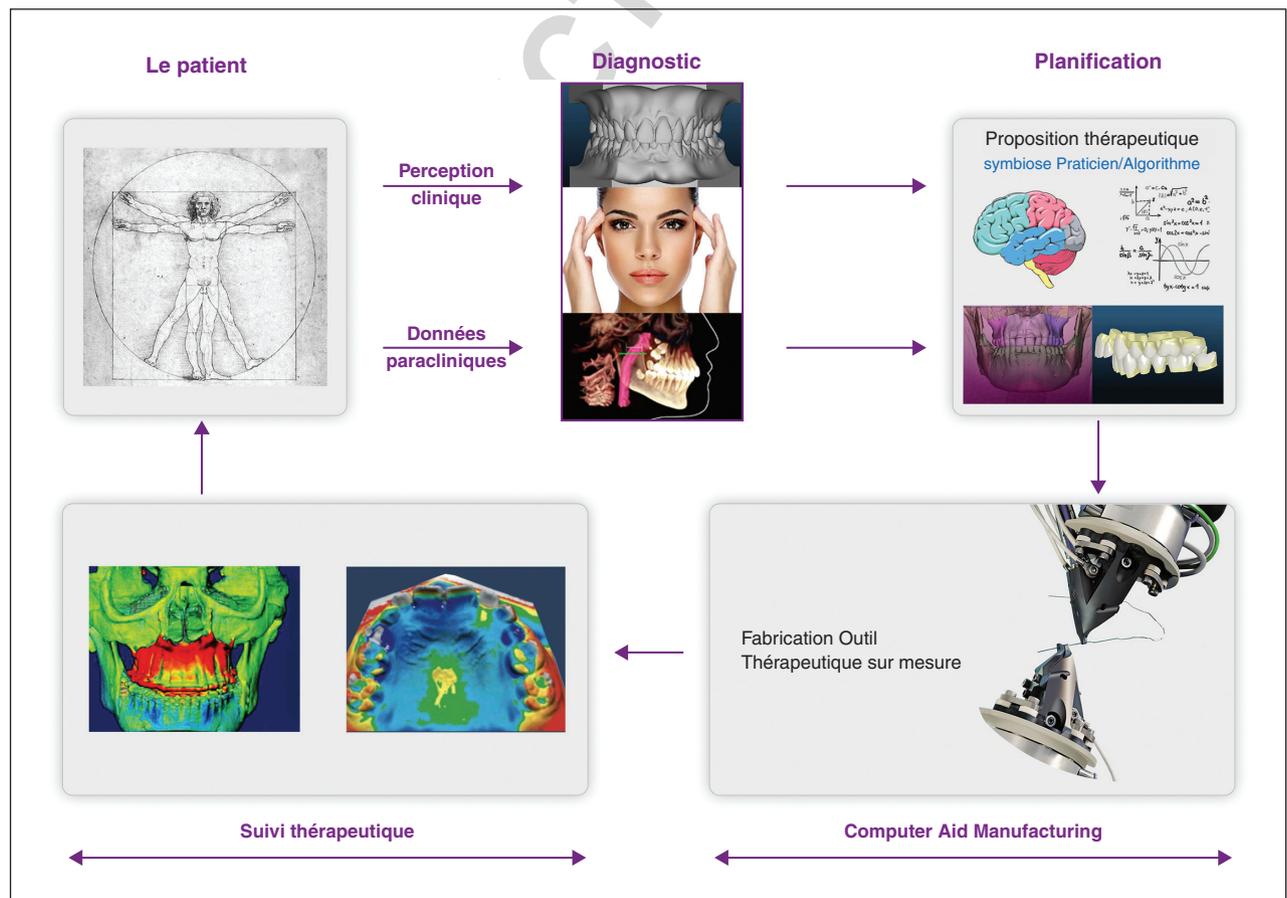


Figure 1
Le workflow numérique.

2.3. Fabrication sur mesure de l'outil thérapeutique

Dans la continuité de la planification, la seconde phase de la technologie CAD/CAM (Computer Aid Design, Computer Aid Manufacturing) permet de fabriquer des dispositifs médicaux sur mesure. L'impression 3D est une des avancées de la révolution numérique vouées à avoir un impact considérable sur notre métier d'orthodontiste¹⁶ : elle supplée le travail manuel de conception, en donnant une réalité physique au projet thérapeutique virtuel et en diminuant le biais humain. Elle est la traduction du passage d'un vecteur manuel vers un vecteur cérébral désormais au cœur de la mutation de notre profession.

Ici aussi, deux procédés s'offrent aux praticiens : après la validation de la proposition thérapeutique, le dispositif orthodontique sur mesure est fabriqué soit à distance par un laboratoire soit par le praticien lui-même, si tant est qu'il possède les imprimantes 3D nécessaires à l'impression des dispositifs en question à partir des fichiers STL. Ce secteur est en plein développement, un des principaux défis étant l'impression directe des aligneurs.

2.4. Suivi thérapeutique

La possibilité de visualiser et de quantifier l'impact de la thérapeutique sur les différentes structures anatomiques présente de nombreux avantages dans le cadre d'une thérapeutique orthodontique.

D'abord, elle permet au praticien de valider les objectifs ou de rechercher ce qui n'a pas fonctionné et au patient de visualiser les effets du traitement. Son intérêt médico-légal semble également évident. Enfin, elle permet d'optimiser le travail d'équipe dans des cas pluridisciplinaires en permettant d'objectiver l'impact des différentes phases et, à travers l'analyse des résultats obtenus, de mieux appréhender les défis cliniques futurs.

L'option idéale pour le suivi thérapeutique est la possibilité d'effectuer des superpositions à l'aide d'outils numériques basés sur l'intelligence artificielle. Ces superpositions numériques sont possibles à différentes échelles.

Des logiciels construits à partir de différents modèles d'apprentissage automatique (*machine learning*) disponibles dans certains scanners intra-oraux permettent de superposer deux modèles numériques d'un même patient^{10,15}, ce qui rend possible la visualisation des mouvements des arcades dentaires. Il existe également d'autres solutions basées sur

l'intelligence artificielle, combinant la photographie numérique et les empreintes numériques : c'est la *3D Matching*¹⁹. Cette technologie permet de superposer sur les photographies des modèles 3D.

Naturellement, les superpositions en imagerie radiologique 3D sont aussi un moyen très précieux pour objectiver l'impact de nos thérapeutiques¹.

3. Les théories de neurosciences cognitives dans l'apprentissage

Les neurosciences cognitives ont effectué d'importants progrès dans la compréhension des processus d'apprentissage. Les travaux réalisés dans ce domaine permettent de voir sous un jour nouveau l'utilisation quotidienne du workflow numérique. Deux théories méritent d'être expliquées plus en détail : la théorie de l'inférence bayésienne et la théorie des quatre piliers de l'apprentissage selon le professeur Stanislas Dehaene.

3.1. L'inférence bayésienne

Comme le soulignent Tenebaum, *et al.*²⁰, pour les scientifiques qui étudient les mécanismes de l'apprentissage humain, le principal défi est de comprendre comment les humains apprennent à partir de si peu. C'est ce que le philosophe Bertrand Russell nomme « le scandale de l'induction ». En somme, il s'agit de notre capacité à construire un modèle théorique à partir d'un exemple vécu.

L'application de la théorie bayésienne aux sciences cognitives permet d'aborder en partie cette problématique. L'inférence bayésienne est une théorie mathématique simple qui caractérise le raisonnement plausible en présence d'incertitude¹⁴. Elle rend bien compte des processus de perception étant donné des entrées ambiguës, notre cerveau en reconstruit l'interprétation la plus probable.

En résumant, on peut dire que notre cerveau construit son modèle d'apprentissage à partir d'exemples qui lui permettent d'ajuster a priori la vraisemblance et la probabilité face à de nouvelles situations avant de prendre ses décisions¹². L'application de ce cadre théorique d'inférence bayésienne à l'orthodontie permet de mettre en exergue le rôle majeur de l'étude des cas cliniques dans l'apprentissage au cours de la formation initiale et tout au long de notre carrière. En effet, c'est en grande partie à partir de ces exemples que l'on forme notre œil de praticien et que l'on modèle notre matrice de décision.

3.2. Les quatre piliers de l'apprentissage

Le professeur Stanislas Dehaene²⁻⁵ a énoncé les quatre piliers essentiels qui permettent à notre cerveau, à la fois structuré et plastique, d'optimiser son apprentissage : l'attention, l'engagement actif, le retour d'information et la consolidation. Voici comment ces piliers ont été définis (Fig. 2).

3.2.1. L'attention

Le premier des quatre piliers est la capacité de notre cerveau à sélectionner une information, l'amplifier, la canaliser et l'approfondir. En effet, abreuvé d'information et stimulé par les sens, le cerveau a besoin d'un filtre pour conserver ce qu'il estime essentiel. Ce qui signifie que « faire attention », c'est faire taire certaines informations jugées non pertinentes pour opérer une sélection parmi elles^{7,8}.

3.2.2. L'engagement actif

Pour apprendre, il faut un engagement actif, ce qui incite à échafauder sans cesse de nouvelles hypothèses. Si vous êtes attentif, concentré, véritable acteur de votre apprentissage, et que vous traitez l'information en profondeur, vous faciliterez grandement votre travail de mémorisation⁹. L'engagement actif est la curiosité¹ qui pousse chacun d'entre nous à explorer son environnement, et la curiosité est un ingrédient essentiel de l'algorithme d'apprentissage de notre cerveau.

3.2.3. Le retour d'information

Le retour d'information est le troisième pilier de l'apprentissage : nous progressons en nous trompant à condition toutefois de recevoir un signal en retour, un feedback : la surprise qui émane du décalage entre la prédiction et la réalité. Le modèle créé par Robert A. Rescorla et Allan R. Wagner nous apprend que le cerveau opère une prédiction puis calcule la différence entre sa prédiction et le stimulus effectivement rencontré, appelée « erreur de prédiction ». Ensuite, il effectue la correction nécessaire pour que sa prochaine prédiction soit plus proche de la réalité. Ainsi, l'option la plus favorable à l'apprentissage est d'avoir un retour sur erreur rapide et précis, sans qu'il s'agisse d'une punition.

3.2.4. La consolidation

Le quatrième pilier de l'apprentissage consiste à passer de l'effort, passage obligé de tout apprentissage, à la consolidation, ce qui permettra à notre cerveau de conserver nos nouvelles connaissances plus longtemps. Par exemple, dans le cas d'un enfant de six ans, le cerveau fournit un effort considérable pour lire et déchiffre lentement. Pour que cette activité devienne une routine, un automatisme, il faudra encore quelques années de pratique intensive. Très énergivore au début, cette activité va de moins en moins solliciter le cortex pariétal et le cortex préfrontal. Après quelques années de pratique, l'enfant lira même

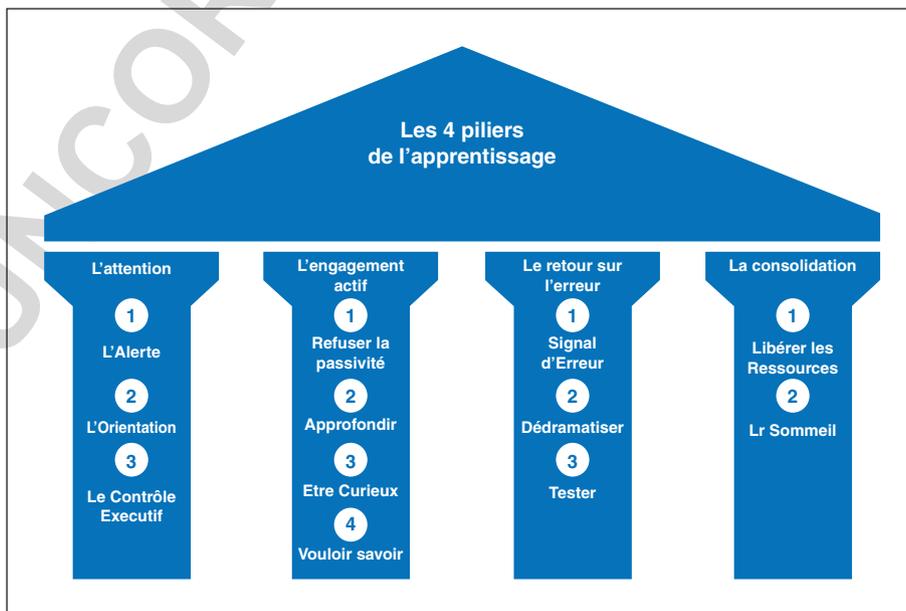


Figure 2

Les quatre piliers de l'apprentissage.

sans effort. Cette routine est primordiale, car elle permet à l'individu de se concentrer sur autre chose.

4. Le flux du travail numérique renferme les quatre piliers de l'apprentissage

En combinant les séquences du workflow numérique et les théories sur l'apprentissage issues des travaux en neurosciences cognitives, on constate que chacune des quatre étapes du workflow peut s'assimiler à un des piliers de l'apprentissage (Fig. 3). Cet état de fait semble donner raison au prix Nobel de littérature Isaac Bashevis Singer : « Plus la technologie progresse, plus les gens s'intéressent aux possibilités du seul esprit humain ».

4.1. Diagnostic / attention

Les outils de diagnostic développés à partir du numérique tendent à amener une plus grande

transparence et une vision tridimensionnelle de la face du patient. La quantité et la qualité de l'information disponible concernant le patient sont nettement amplifiées, ce qui permet à notre cerveau de mieux sélectionner l'information jugée importante et de l'approfondir, étant à même d'effectuer une observation plus précise. En outre, grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle, des mesures comme le tracé céphalométrique peuvent être automatisées, ce qui allège notre cerveau d'une charge cognitive, en le rendant plus disponible au traitement qualitatif de l'imagerie clinique du patient. Mais le facteur le plus important pour réussir à améliorer l'attention du praticien grâce à l'outil numérique, c'est notre capacité à créer un filtre pour conserver ce qu'on estime essentiel. En effet, le piège est de se noyer dans une masse de données rendue possible grâce à la puissance de l'outil numérique. Au contraire, si le praticien désire augmenter son attention, il doit être capable de

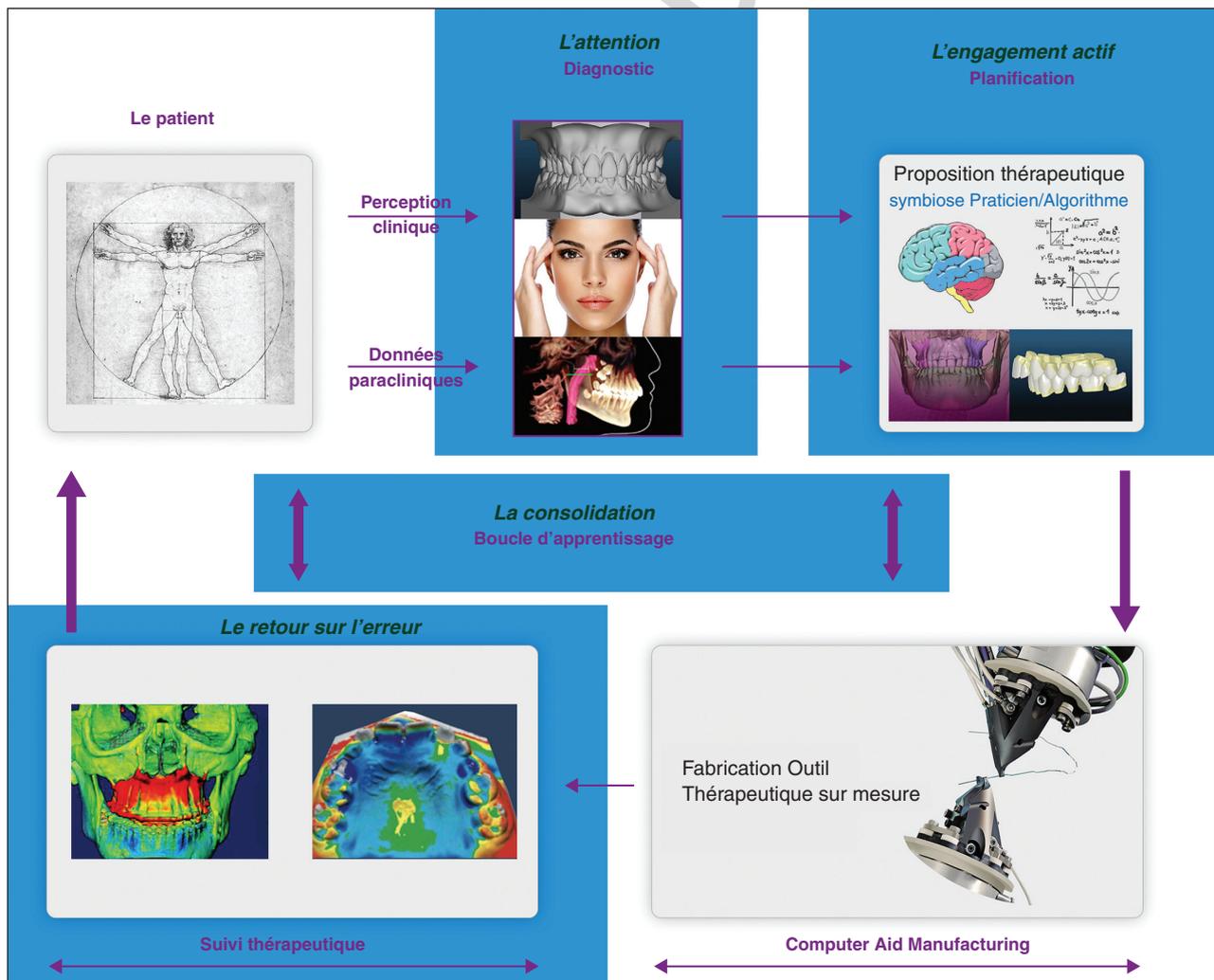


Figure 3
Le flux du travail numérique renferme les quatre piliers de l'apprentissage.

faire un tri pour conserver dans une matrice de prise de décision uniquement les données vraiment pertinentes pour chaque patient : « faire attention », c'est faire taire certaines informations et en sélectionner quelques-unes.

En somme, il s'agit de toujours maintenir une certaine cohérence entre ses observations cliniques et le choix des examens paracliniques en appliquant le principe dit du rasoir d'Ockham (qui peut se résumer dans la formule « les multiples ne doivent pas être utilisés sans nécessité »). Ainsi, les différents outils d'imagerie numérique peuvent potentialiser l'attention du praticien si tant est qu'on soit capable de mettre en place une véritable stratégie de gestion de cette imagerie, tout en évitant une systématisation intempestive.

4.2. Planification / engagement actif

La mise en place d'un schéma thérapeutique basé sur le CAD/CAM (Computer Aid Design, Computer Aid Manufacturing) nécessite la modélisation des objectifs thérapeutiques en 3D, dont l'expression la plus manifeste est le set-up virtuel dynamique. Bien sûr, tout dépend du degré d'implication du praticien dans l'édification du set-up. Cependant, il semble évident qu'un praticien investi dans la construction et la validation du set-up virtuel dynamique va être amené à être attentif aux objectifs thérapeutiques et traiter les informations en profondeur pour valider la faisabilité du projet thérapeutique. En outre, s'il possède une bonne maîtrise de l'outil numérique, couplée à une bonne vision des données du patient, ainsi qu'à une connaissance de la biomécanique, il va pouvoir échafauder sans cesse de nouvelles hypothèses, verbaliser à travers la construction du set-up son intuition clinique. Ce travail de planification virtuelle constitue donc un véritable moteur de l'engagement actif tout à fait compatible avec une vision quasi ludique du travail du praticien, attisant sans cesse sa curiosité, un ingrédient essentiel de l'algorithme d'apprentissage de notre cerveau. Ainsi, la planification thérapeutique peut être l'épicentre de l'engagement actif, pilier d'un meilleur apprentissage chez le praticien, à condition que celui-ci soit totalement impliqué dans la construction du set-up virtuel dynamique. Plus il s'amusera et aura l'occasion de cultiver sa curiosité, plus son apprentissage sera performant ; et plus il jouera un rôle de « *provider* » (fournisseur), conformément aux diktats de certaines multinationales, plus l'intérêt clinique se verra amoindri.

4.3. Suivi thérapeutique / retour sur erreur

Nous progressons si nous nous trompons, à condition toutefois de recevoir un signal en retour. Les outils numériques permettent un bien meilleur suivi du patient, de plus en plus précis et rapide, ceci d'autant plus qu'ils peuvent être reproduits fréquemment tout au long du traitement (à l'exception de l'imagerie radiologique ionisante, qui doit être justifiée chaque fois). Couplées à la possibilité d'effectuer des mesures automatiques grâce aux techniques de « *deep learning* », ces technologies permettent de voir et de mesurer instantanément l'impact de nos thérapeutiques, et de visualiser ce qui n'a pas fonctionné. Une véritable stratégie de monitoring du patient permet d'avoir un retour sur erreur rapide et précis, à condition de rester attaché à une forme d'honnêteté intellectuelle et de ne pas se blâmer soi-même pour ses erreurs, comme on a souvent tendance à le faire, d'une manière on ne peut plus contre-productive sur le plan des techniques d'apprentissage.

4.4. La consolidation

On le constate tous les jours, l'intensification de l'environnement numérique génère une accélération de rythme. Une mise en place structurée du workflow numérique et des techniques (CAD/CAM) utilisées de façon quotidienne rend possible une consolidation. L'enjeu majeur est pour le praticien de rester connecté au workflow numérique au lieu de simplement le subir ; il s'agit, par exemple, de palier la perte du sens haptique ou de créer une interface homme-machine ergonomique privilégiant le confort du praticien au respect du *process* industriel.

En somme, si le workflow est construit autour du travail cognitif du praticien, chaque cas clinique traité viendra consolider son expérience clinique. En revanche, si le workflow est centré sur l'appareil orthodontique (aligneur, appareil lingual), le praticien se voyant relégué à un rôle plus proche de celui du « *provider* » (fournisseur) ou du contrôleur de qualité, l'impact positif sur le renforcement de l'apprentissage du praticien sera significativement moindre.

5. Conclusion

Notre rapport aux nouvelles technologies sera un élément déterminant dans la construction de notre identité d'orthodontistes du 21^e siècle.

Si l'enjeu de cette nouvelle interface est de tendre vers une stratégie d'augmentation, le clinicien doit se fixer pour objectif de progresser et d'augmenter son expertise tout au long de sa carrière.

Les neurosciences cognitives nous montrent que notre cerveau fonctionne sur un mode bayésien, en construisant ses modèles théoriques et sa matrice décisionnelle à partir d'exemples concrets. Ce qui s'illustre dans notre pratique de l'orthodontie par l'importance fondamentale que revêt l'observation de cas cliniques.

Lorsqu'on met en parallèle le schéma du workflow numérique en orthodontie et les quatre piliers de l'apprentissage théorisés par le professeur Dehaene, on s'aperçoit que l'utilisation du flux numérique peut être un formidable outil d'apprentissage au service du praticien, désormais à même d'obtenir un précieux retour sur expérience lors de chaque cas clinique traité.

Cet objectif suppose cependant une véritable stratégie numérique, centrée sur la cognition du praticien. Cette stratégie n'est possible que si le praticien garde sa liberté d'action et de réflexion, un défi très difficile à relever, mais qui en vaut la peine. Songeons au mot de Malraux : « La liberté appartient à ceux qui l'ont conquise ».

Liens d'intérêt

Les auteurs déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt concernant les données publiées dans cet article.

Références

1. Cevidanes L, Bailey L, Tucker G, *et al.* Superimposition of 3D cone-beam CT models of orthognathic surgery patients. *Dentomaxillofac Radiol* 2005;34(6):369-375.
2. Dehaene S. Apprendre les talents du cerveau, le défi des machines. Paris : Odile Jacob, 2018.
3. Dehaene S. Le Code de la conscience. Paris : Odile Jacob, 2014.
4. Dehaene S, Changeux J-P. Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron* 2011;70(2):200-227.
5. Dehaene S, Pegado F, Braga LW, Ventura P, Nunes Filho G, Jobert A, Cohen L. How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science* 2010;330(6009):1359-1364.
6. Dervin F, Abbas Y. Technologies numérique du soi et (co)-construction identitaires. Paris : L'Harmattan, 2009.
7. Desimone R, Duncan J. Neural mechanisms of selective visual attention. *Annu Rev Neurosci* 1995;18:193-222.
8. Duncan J. The structure of cognition : Attentional episodes in mind and brain. *Neuron* 2013;80(1):35-50.
9. Freeman S, Eddy SL, McDonough M, Smith MK, Okoroafor N, Jordt H, Wenderoth MP. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proc Natl Acad Sci USA* 2014;111(23):8410-8415.
10. Ganzer N, Feldmann I, Liv P, Bondemark L. A novel method for superimposition and measurements on maxillary digital 3D models-studies on validity and reliability. *Eur J Orthod* 2018;40(1):45-51.
11. Gottlieb J, Oudeyer P-Y, Lopes M, Baranes A. Information-seeking, curiosity and attention : Computational and neural mechanisms. *Trends Cogn Sci* 2013;17(11):585-593.
12. Gweon H, Tenenbaum JB, Shulz LE (2010). Infants consider both the sample and the sampling process in inductive generalization. *Proc Natl Acad Sci USA* 2010;107(20):9066-9071.
13. Hennessy J, Al-Awadhi EA. Clear Aligners Generations and Orthodontic Tooth Movement. *J Orthod* 2016;43(1):68-76.
14. Jaynes ET. *Probability Theory : The logic of Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
15. José Viñas M, Pie de Hierro V, M Ustrell-Torrent J. Superimposition of 3D digital models: A case report. *Int Orthod* 2018;16(2):304-313
16. Lagravère MO, Flores-Mir C. The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners: a systematic review. *J Am Dent Assoc* 2005;136(12):1724-1729.
17. Makaremi M. Les enjeux d'une nouvelle interface. *Rev Orthop Dento Faciale* 2018;52:319-324.
18. Nishimoto S, Sotsuka Y, Kawai K, Ishise H, Kakibuchi M. Personal Computer-Based Cephalometric Landmark Detection With Deep Learning, Using Cephalograms on the Internet. *J Craniofac Surg* 2019;30(1):91-95.
19. Roisin L-C, Brézulier D, Sorel O. Contrôle à distance en orthodontie : fondements et description de la solution Dental Monitoring™. *Rev Orthop Dento Faciale* 2016;50(3):303-313.
20. Tenenbaum JB, Kemp C, Griffiths TL, Goodman ND. How to grow a mind : Statistics, structure, and abstractions. *Science* 2011;331(6022):1279-1285.
21. Zamora N, Llamas J-M, Cibrián R, Gandia J-L, Paredes V. A study on the reproducibility of cephalometric landmarks when undertaking a three-dimensional (3D) cephalometric analysis. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 2012;17(4):e678-88.