

# Nouvelles technologies optiques, quel impact sur les systèmes de réalité augmentée de demain ?

Par Jean-Louis de BOUGRENET DE LA TOCNAYE

Professeur, chef du département d'Optique à l'IMT Atlantique

La réalité augmentée (RA) a souvent progressé à la faveur de sauts technologiques. Ce fut le cas avec la miniaturisation des afficheurs, des pico-projecteurs et des combineurs. Les dernières avancées dans le secteur de la conception/fabrication d'optiques, dites à effet de surface (*e.g.* méta-surface, -lentille et -forme) auront-elles le même impact sur les dispositifs de projection des futurs systèmes RA ? Des avancées ont déjà eu lieu dans ce domaine avec les *freeforms*. De la même façon, le développement de la RA holographique, porté par la montée en puissance dans le domaine *consumer* des lunettes intelligentes, imposera-t-il ce choix à l'ensemble des dispositifs RA ? Autant de questions qui seront brièvement abordées dans cet article, consacré à la couche optique des systèmes RA. Enfin, dans cette course permanente vers toujours plus d'immersivité et du plus près de l'œil, les lentilles de contact seront-elles le futur de la RA hyper-immersive ? Quelles sont les dimensions ultimes que l'on pourra raisonnablement atteindre ? Autant de questions que l'on tentera d'aborder ici.

## INTRODUCTION

Le déploiement des dispositifs de réalité augmentée (RA) a souvent été rythmé par les avancées technologiques. Employée dès les années 1950 dans le secteur de la défense [1], la RA a dû attendre les années 1990 pour bénéficier de nouveaux concepts d'affichage. Cette décennie sera propice à l'extension dans divers domaines comme l'aéronautique civile [2] (simulateur de vol, écran sur *Head Mounted Display* –HMD) et l'automobile (affichage tête haute *Head up Display* – HUD). Il faudra patienter encore une quinzaine d'années pour voir des HMD RA immersifs à écrans d'affichage pour *smartphones* [3]. L'écosystème technologique du *smartphone*, sa connectivité sèmeront les germes du second boom de la RA, posant les premières briques pour les intégrateurs présents aujourd'hui sur le marché. Ces technologies d'affichage ont été le véritable catalyseur des générations qui suivront jusqu'à nos jours.

L'émergence de dispositifs d'affichage immersifs proches des yeux (*Near-To-Eye*, NTE) va soulever d'autres questions comme l'étendue des sources, la focalisation statique, la gestion de faibles contrastes et luminosités. Ces défis vont mettre l'accent sur les dispositifs de projection qui concentrent aujourd'hui la plupart des efforts, afin de mieux les adapter aux spécificités du système visuel humain. Si l'on regarde les évolutions actuelles en matière de technologies optiques, on peut penser que l'arrivée à maturité des technologies de méta-surfaces [4], qui diffusent aujourd'hui dans de nombreux secteurs, constitue une nouvelle étape de rupture dans l'histoire des dispositifs RA. J'en veux pour preuve la convergence entre technologies silicium et méta-surfaces illustrée par l'association entre Metalenz et STMicroelectronics [5] pour produire les caméras compactes à grande profondeur de champ de nos *smartphones*, démontrant le potentiel de ces nouvelles technologies.

Ceci ne sous-estime en rien le poids des logiciels qui feront des systèmes RA les prochaines plateformes informatiques, remplaçant ordinateurs portables et tablettes. Bien au contraire, cela renforce les exigences de ces plateformes en matière d'optiques compactes (moteur d'affichage, optique de combinaison, etc.). S'il fallait montrer à quel point les aspects matériels et logiciels sont devenus indissociables, je citerais le rapprochement entre Meta et Essilor-Luxottica [6] sur les lunettes intelligentes. Le sujet est donc vaste et complexe, y compris sous l'angle matériel. Je n'ai pas l'ambition de le traiter en entier. J'insisterai sur les blocs optiques de projection (principaux points de blocage) pour montrer comment l'émergence de nouvelles filières technologiques pourrait conduire à des avancées significatives en RA. Je traiterai les deux options majeures de combineurs, cœur des systèmes RA actuels. De nombreuses autres solutions ont été proposées pour contourner les limitations des systèmes optiques, telles que l'approche holographique rendue possible grâce au déploiement de sources laser intégrées, permettant de contourner certains invariants des systèmes d'imagerie. Je finirai enfin avec quelques solutions exotiques comme les lentilles de contact. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter au très complet ouvrage de Bernard Kress [7], dont je conseille la lecture.

Avant cela, rappelons quelques exigences à l'origine des défis matériels imposés aux dispositifs RA, comme le besoin d'immersion, lié aux perceptions multisensorielles et le confort (réduction du poids, de la taille, recul du centre de gravité), visuel (repères 3D naturels, large FOV, une bonne résolution angulaire), et social. Pour faciliter la compréhension, je rappellerai les ruptures technologiques en train de révolutionner la conception et la fabrication optique et auxquelles je ferai appel par la suite.

## LES OPTIQUES MINCES : *FREEFORM*, META-SURFACE, -LENTILLE, -FORME

De façon simplifiée une surface *freeform* est une surface dont la forme n'a pas de symétrie de translation ou de rotation par rapport aux axes normaux au plan moyen [8]. Cela affranchit la conception optique. Les surfaces traditionnelles étant sphériques ou asphériques à symétrie de rotation, l'usage d'optique anamorphique implique la combinaison avec des surfaces toroidales. Les *freeforms* permettent un traitement naturel des aberrations [9], ce qui est un élément important du confort visuel en RA.

Les méta-surfaces sont de nature très différente. Ce sont des versions planaires minces des métamatériaux [4], constituées de nano-éléments dont la dimension est inférieure à la longueur d'onde. Elles permettent de bloquer, absorber, concentrer, disperser, guider les ondes. Ce sont des effets de surface. Pour simplifier, le contrôle de la taille et de la forme des cellules unitaires (les méta-atomes [4]) permet d'obtenir plusieurs indices effectifs et créer différents comportements de surface. Les méta-lentilles sont une extension des méta-surfaces, appliquée à des profils de phase non uniforme ou périodique, comme c'est le cas pour une lentille (voir la Figure 1a). Cela se fait par une micro-structuration au moyen de groupes de méta-atomes. Ceci permet de concevoir des optiques à très grandes ouvertures numériques ( $NA > 0,8$ ), corriger des aberrations (e.g. chromatiques), concevoir des optiques polarisantes, le tout à partir de surfaces minces [4], avantage clé en RA. Pour plus de détails le lecteur pourra consulter l'ouvrage de référence de H. Benisty, J.-Y. Geffret et Ph. Lalanne [11].

Les méta-formes [10] (Figure 1b) sont des surfaces optiques combinant les avantages d'une *freeform* et d'une méta-surface en un même élément. Elles répondent aux critères de systèmes optiques à haute résolution, avec un facteur de forme compact, tels les écrans de RA comme on le verra. La nouveauté est que ces technologies sont manufacturables de nos jours, y compris dans la bande visible [11].

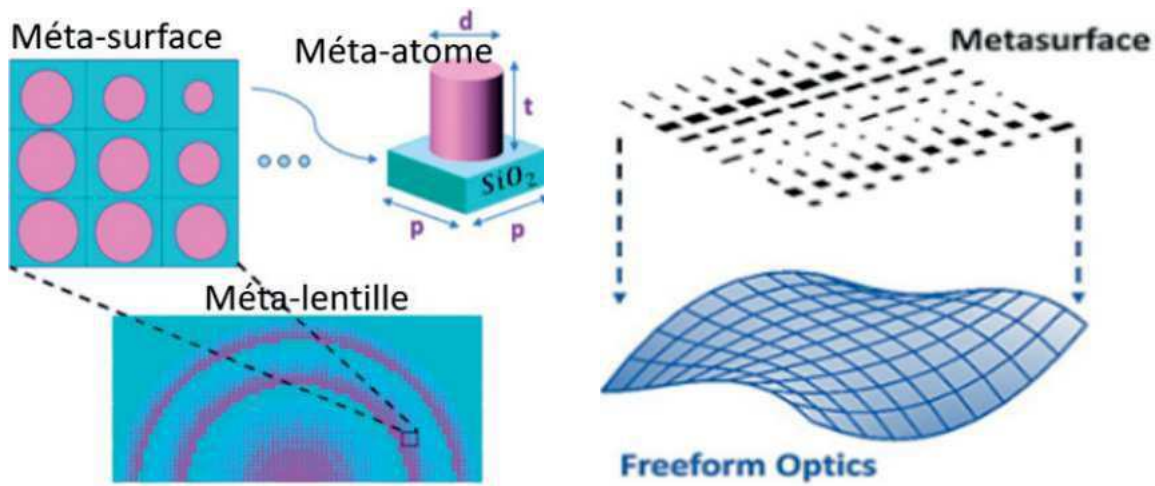


Figure 1 : a) exemple de méta-lentille tiré de [4] ; b) exemple de méta-forme tiré de [10].

## QUELQUES PARAMÈTRES CLÉS

Ce sont principalement l'immersivité et la performance des dispositifs RA, en intégrant l'œil humain. Tout d'abord l'*eye-box* (*i.e.* la région 3D entre le combineur et la pupille de l'œil sur laquelle le FOV<sup>1</sup> est visible, à pupille donnée), le FOV (*i.e.* champ de vue sur lequel une image est projetée), mesuré en degrés et sa résolution en pixels/degrés, la MTF (fonction de transfert) du système optique formant l'image en champ proche ou lointain qui doit correspondre à la résolution de l'écran sur le FOV. Un bon système RA exige une résolution autour de 0,3 minute d'arc. Pour le commun, une résolution angulaire  $< 0,8$  est courante (en fovéa<sup>2</sup>), mais diminue avec l'âge. Notons qu'une augmentation de la plage de distances inter-pupillaires (IPD) résulte en une augmentation de l'*eye-box*. Pour un système optique donné, ce dernier est inversement proportionnel au FOV. Il y a bien entendu d'autres paramètres. Je ne citerai ici que ceux qui jouent un rôle clé dans le dimensionnement des optiques.

## LA PIERRE ANGULAIRE D'UN SYSTÈME RA : LE COMBINEUR

C'est lui qui permet la superposition du monde réel et des objets virtuels (2D ou 3D). Il est responsable de la qualité de l'imageur. Il définit la taille de l'*eye-box* et très souvent le FOV. Je ne traiterai ici que des deux principaux combineurs utilisés aujourd'hui, dans la plupart des systèmes RA.

### Les combineurs optiques en espace libre

Au-delà des multiples variantes dont a fait l'objet cette configuration, il s'agit avant tout d'un dispositif d'imagerie (afficheur, optique et œil). Le combineur (Figure 2a) est la surface semi-transparente qui permet la superposition d'une image provenant d'un afficheur (*micro-display*) sur notre vision courante. Comme tout dispositif d'imagerie il

<sup>1</sup> <https://www.realite-virtuelle.com/fov-quest-field-view-0208/>

<sup>2</sup> La fovéa, la zone centrale de la macula, est la zone de la rétine où la vision des détails est la plus précise. Elle est située dans l'axe visuel de l'œil.

doit vérifier la condition d'aplanétisme ou des sinus d'Abbe (invariant de tout système optique stigmatique) qui relie le FOV à la résolution angulaire, et au grandissement, trois paramètres clés pour l'optimisation d'un système optique d'imagerie. Appliqué à l'imagerie RA, cela se traduit par une résolution angulaire élevée, un grand FOV et un grand *eye-box*. Or on sait que quand on élargit le FOV (*e.g.* en augmentant l'ouverture numérique du système de collimation), l'*eye-box* diminue ainsi que la résolution angulaire et par voie de conséquence, la taille de l'optique aussi.

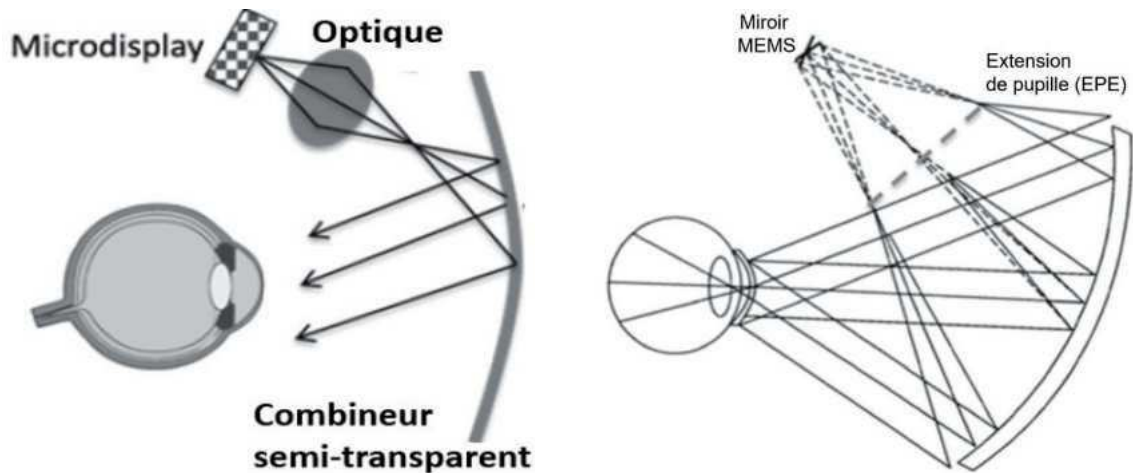


Figure 2 : a) principe du combineur tiré de [7] ; b) exemple d'extension de pupille tiré de [7].

Du fait du volume limité, on peut replier les chemins, avec le risque de créer des angles élevés et générer des aberrations supplémentaires (*e.g.* astigmatisme). Il y a plusieurs façons [7] de contourner cette difficulté : par expansion (EPE) ou duplication de la pupille (les plus courantes). La Figure 2b montre une expansion de pupille pour élargir l'IPD, condition requise pour limiter la perte de binocularité. Ceci se traduit par l'ajout d'éléments supplémentaires, avec parfois de possibles parties mobiles [12].

Ces limitations (grand angle lié souvent au repliement) démontrent que les optiques conventionnelles (réfractives) sont mal adaptées. Ceci a conduit à considérer les optiques diffractives. Nous y reviendrons plus tard. Sinon une solution moderne consiste à utiliser des *freeforms* ou méta-formes pour corriger ces forts excentremets (Figure 3a). On les retrouve dans les combineurs de type à prisme TIR (Total Internal Reflection) (Figure 3b) dont les surfaces sont souvent des *freeforms* ou méta-formes.

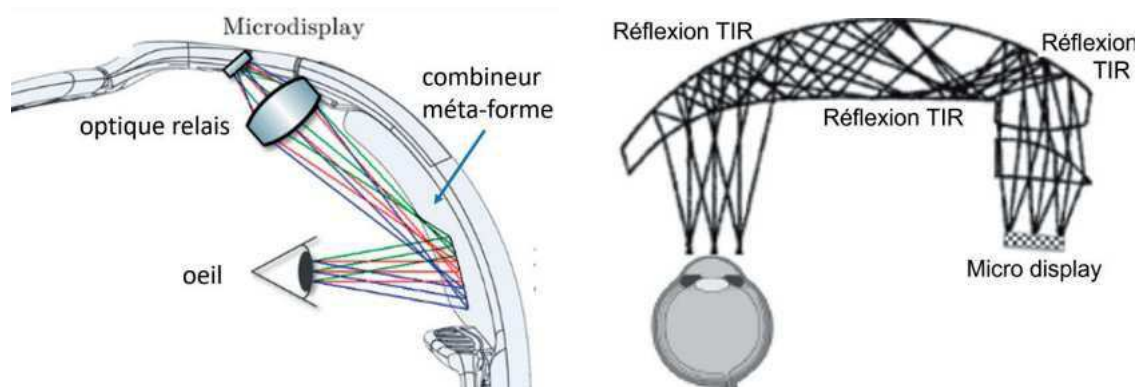


Figure 3 : a) combineur méta-forme tiré de [10] ; b) combineur prisme TIR tiré de [7].

La fabrication de *freeforms* par usinage diamant, très courante aujourd’hui, a libéré la créativité des ingénieurs pour la conception d’optiques RA, en particulier pour les guides combineurs, dans le but ouvrir l’*eye-box*, sans pénalité sur la fonction de transfert de modulation (MTF), grâce à la correction d’aberrations, combinée à l’utilisation de sources laser ou de diodes électroluminescentes, voire de diodes super-luminescentes qui permettent un champ de vision plus large (grâce à leur dispersion angulaire). Cela nous amène naturellement au second combineur.

## Les combineurs optiques à base de guides de lumière

Le combineur *freeform* TIR est l’ancêtre du combineur à guide d’ondes qui repose sur la propagation de la totalité du champ dans un guide optique agissant comme un périscope [13] (Figure 4a), avec une pupille d’entrée unique et souvent plusieurs en sortie. Les soucis sont l’achromatisation du trajet et les pupilles d’entrée et de sortie, comprenant les coupleurs. Ces derniers sont l’élément clé du combineur. Ce sont des prismes, des réseaux de micro-prismes, holographiques, à relief de surface, de méta-surfaces ou de guides résonnants. On peut courber le guide, ce qui peut être avantageux. Ce combineur a fait l’objet de multiples réalisations. B. Kress y consacre un chapitre entier. J’encourage à s’y reporter. Je détaille ici une option qui constitue un champ complet de développement aujourd’hui : les coupleurs diffractifs dont on peut penser que le déploiement des méta-surfaces contribuera à imposer.

L’approche diffractive permet en effet l’emploi de surfaces minces. L’angle maximal de diffraction variant en arcsin ( $\lambda/\delta$ ), ( $\delta$  est la taille de l’élément diffractant, *e.g.* le pixel du modulateur spatial – SLM), plus le pixel est petit plus le FOV sera grand. L’utilisation de méta-surfaces fixes [14] ou variables [15] permet aujourd’hui de réaliser des coupleurs de surface très compacts (*e.g.* le bloc d’entrée de la Figure 4a est supprimé). Ceci est une vraie rupture technologique. On observe une activité importante dans la conception de méta-surfaces de ce type, motivée en partie par la RA.

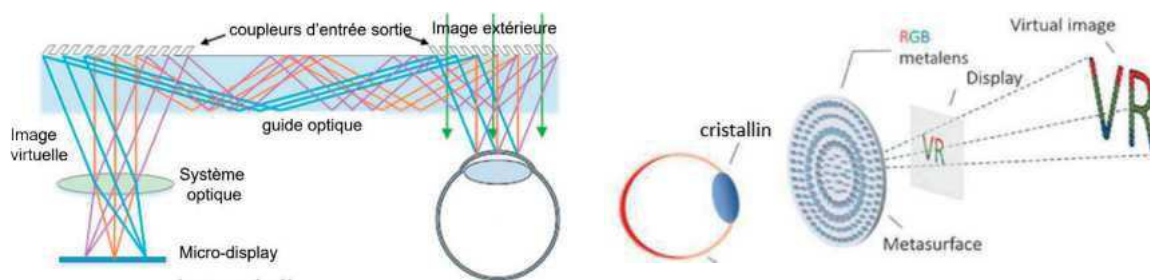


Figure 4 :

a) principe du combineur à guide tiré de [15] ; b) exemple de métalentille achromatique tiré de [16].

La Figure 4b montre une méta-surface [16] pour achromatiser la projection d’images obtenues à partir d’un écran Rouge-Vert-Bleu (RGB). Les sources sont des lasers. La conception de ce type d’éléments a beaucoup évolué. Une méta-surface n’est plus conçue de nos jours séparément des autres éléments. Connues sous le nom d’*inverse design* méta-surfaces, leur calcul intègre des connaissances *a priori* sur les images projetées (*via* une dose d’IA) pour améliorer le rendu visuel, parfois encore médiocre en imagerie holographique. Le nouvel usage de méta-atomes dits topologiques [17] est également un élément d’amélioration de l’efficacité de ces optiques. Cette pratique est indispensable au plein succès des méta-surfaces dans les combineurs RA. Ces considérations nous amènent naturellement à aborder le cas de la RA holographique.

## L'APPROCHE DIFFRACTIVE HOLOGRAPHIQUE

Le terme hologramme est largement utilisé par la communauté de la RA. Il désigne les images stéréo. Il ne s'agit pas de cela ici. Ce sont généralement des éléments optiques diffractifs (DOE). Ils opèrent dans différents régimes de diffraction (Fourier, Fresnel, etc.) et sont éclairés par des sources cohérentes (*i.e.* des lasers). Des algorithmes itératifs du type IFTA [18] permettent de les calculer. L'intérêt de cette approche est la compacité du système d'imagerie et la taille du DOE. L'extension à des éléments optiques méta-surfaces (MOE) est naturelle avec une efficacité dans le visible qui reste toutefois à améliorer. Dans le domaine RA, les DOE se doivent d'être variables, ce qui requiert l'emploi de modulateurs de lumière (SLM) de phase [19] qui sont les composants clés de la RA holographique. Beaucoup de progrès ont été accomplis dans ce secteur, grâce à leur industrialisation massive pour les HUD automobiles, pour lesquels la solution diffractive est bien adaptée et compétitive [20].

Leur mise en œuvre dans les HMD est limitée, même si l'approche a l'avantage d'un faible encombrement et de grands FOV. La qualité de leur imagerie (cohérente) questionne encore pour la RA très haut de gamme. On peut parier néanmoins que le développement de la lunetterie intelligente, utilisant ce principe va accélérer leur déploiement grâce aussi à la disponibilité de lasers RGB très compacts. L'extension à des MOE dynamiques demeure complexe avec la technologie actuelle, compte tenu de la taille des méta-atomes et des variations d'indice exigées. Elle ne sera pas immédiate. Quelques solutions commencent néanmoins à voir le jour [15].

## QUELQUES SOLUTIONS DE RUPTURE

La course vers plus d'immersivité conduit à concevoir des dispositifs de plus en plus proches de l'œil. Les deux exemples suivants illustrent cette démarche extrême.

### Le contournement du bloc oculaire par éclairage rétinien

Une façon de s'affranchir des contraintes de dimensionnement optique consiste à exploiter la composante temporelle de la persistance rétinienne, *e.g.* par un balayage rétinien (Figure 5a). Ces dispositifs [21] existent depuis des décennies. Compacts et efficaces, ils utilisent des lasers en mode balayage ce qui permet de contourner le système oculaire en

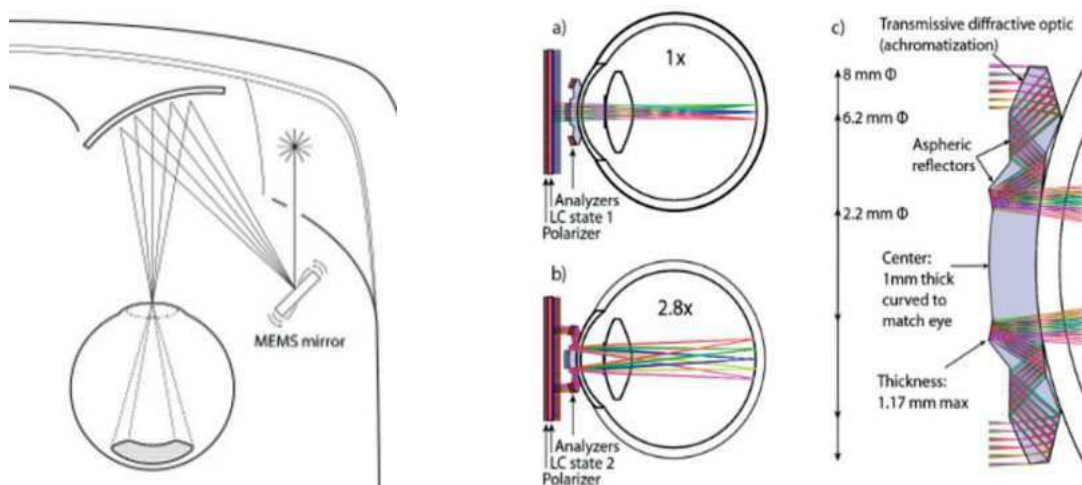


Figure 5 : a) système RA à balayage laser tiré de [7] ; b) lentille avec visée télescopique tiré de [26].

raison du faible diamètre des faisceaux pénétrant ainsi l'œil. L'image est nette et indépendante de l'accommodation ce qui évite les conflits d'accommodation-vergence. Cette solution est utilisée pour les lunettes monoculaires intelligentes ou l'affichage de textes. On est loin toutefois de la RA haut de gamme. Leur faible *eye-box* restreint le FOV effectif, et le *speckle* [22] nuit à la qualité d'image, comme la plupart des solutions diffractives. Une approche innovante contournant la limite de diffraction a été proposée récemment par le CEA-Leti [23].

## Les lentilles de contact RA

Transférer une optique RA dans une lentille de contact (*i.e.* sclérale rigide) a suscité naturellement l'intérêt et les tentatives, encouragés par le succès de capteurs embarqués (*e.g.* chimiques, jauges de pression intra-oculaire [24]). La tentative RA la plus aboutie, dans les années 2020, est celle de la société californienne Mojo-Vision qui maîtrisait la technologie des afficheurs à LED [25] et qui a proposé l'intégration d'un bloc complet RA dans une lentille de contact. Malgré des avancées dans la techno d'affichage, ce projet n'a pas abouti du fait du facteur de forme trop contraint. En effet, à supposer que la surface utilisable couvre partiellement la sclère, pour une épaisseur au centre  $< 500 \mu\text{m}$ , le volume disponible est  $< 50 \text{ mm}^3$ , soit un à deux ordres de grandeur inférieurs aux facteurs de forme et de volume discutés plus haut. Outre l'obstruction de la pupille qui n'est pas souhaitable pour de multiples raisons, on voit qu'il est difficile, voire impossible, d'encapsuler dans un aussi petit volume des combineurs optiques, quelle que soit leur nature. Il existe alors deux options.

Les solutions hybrides où l'afficheur ou l'écran est hors de la lentille [26] (Figure 5b) mais assez proche pour un bon compromis FOV/*eye-box* et une encapsulation complète où l'optique de projection et la source sont dans la lentille de contact. Si dans le premier cas on retrouve le même souci d'alignement avec l'œil qu'un système RA classique, cela permet de contourner l'optique visuelle ce qui est positif. Dans l'autre cas [27], les règles d'ingénieur s'appliquent et l'approche diffractive est la plus adaptée au volume restreint [28]. Si les DOE sont fixes, une solution existe, par contre s'ils sont reconfigurables, les SLM de phase n'ont pas encore atteint la taille requise pour permettre une telle intégration, même si cela est envisageable dans le futur.

La solution PRAR [29] est un exemple de solution à DOE fixes multiples. Le dispositif comporte un ensemble de DOE disposés sur une couronne en bordure de pupille (Figure 6). Ces DOE sont en sortie d'un TIR annulaire en périphérie de la pupille et connectés à un jeu de sources laser (autant que de DOE) contrôlables à distance, éclairant ces DOE et projetant une image sur la zone rétinienne choisie.

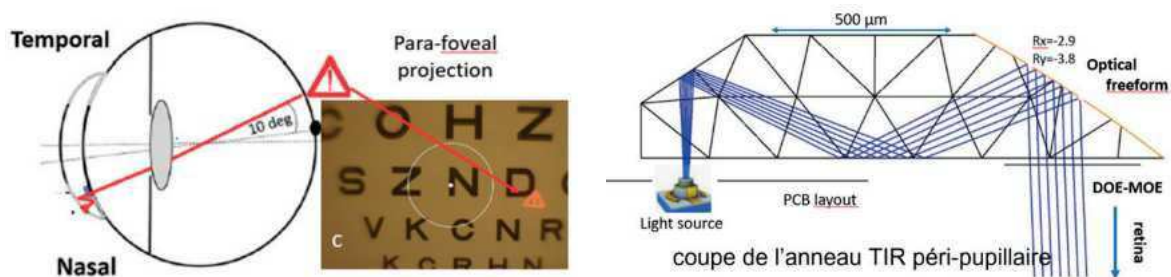


Figure 6 : a) principe de la projection parafovéale ; b) vue en coupe du TIR-PRAR tiré de [28].

Cette technique de projection pupillaire contourne le système oculaire (limitant les aberrations propres à celui-ci). Un tel TIR annulaire est facilement encapsulable. Il permet l'implantation de *freeforms* sur la surface externe réfléchissante et de DOE ou de MOE, sur la base annulaire et orientés vers l'intérieur de l'œil (Figure 6b).

## QUELQUES HYPOTHÈSES ET TENDANCES

Le champ de développement des dispositifs RA est devenu très vaste. Il ne se limite plus aux aspects technologiques même s'ils en conditionnent encore largement les progrès. On voit se dessiner deux tendances marquées aux choix technologiques différents. La RA haut de gamme avec écrans/afficheurs à grande étendue, pour des contenus 3D de haute qualité. Ceux-ci ont bénéficié des avancées du surfaçage *freeform* qui s'intensifieront avec les méta-formes. Ces améliorations incrémentales devraient surtout impacter les guides/combineurs. L'emploi d'optiques méta minces à grande ouverture devrait permettre un gain significatif en immersivité.

La voie holographique, qui va profiter pleinement des lasers bas coût miniaturisés, va gagner en qualité et bénéficier du déploiement de la lunetterie intelligente moins exigeante en RA-3D. On sera davantage dans la version *consumer* d'un HUD, pour lequel cette approche a de nombreux atouts. L'impact du surfaçage *freeform* est moindre ici. L'enjeu est plutôt côté méta-lentilles fixes et surtout reconfigurables, qui constituent encore un véritable défi technologique.

En matière de lentilles de contact, un dispositif RA-3D riche, dans une lentille de contact est très difficile à imaginer, du fait du volume très restreint. La solution diffractive/holographique est par contre envisageable, à partir d'éléments fixes projetant des images directement sur la rétine. On peut imaginer ces solutions pour les systèmes de vigilance ou de navigation, et surtout pour des dispositifs médicaux (*e.g.* assistance et réhabilitation visuelle). L'extension à une version dynamique impose une miniaturisation importante des SLM, ce qui n'est pas pour tout de suite.

Une ligne de partage semble se dessiner entre RA riche haut de gamme et RA holographique pour des dispositifs plus intégrés comme des lunettes, voire des lentilles de contact. Cette distinction est sans doute temporaire, car conditionnée aux progrès technologiques (*e.g.* miniaturisation des écrans) et au déploiement à l'échelle industrielle de méta-surfaces, comme l'a montré STMicroelectronics avec les caméras de *smartphone*.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] COLBURN W. S. *et al.* (1977), "Holographic combiners for head up displays", Tech Report, n°AFAL-TR-77-110.
- [2] BARFIELD W. (2015), *Fundamentals of wearable computers and augmented reality*, Second Edition, Taylor & Francis, Boca Raton, FL.
- [3] AMITAI Y. *et al.* (1989), "Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays", *Applied Optics*, 28, pp. 3405-3416.
- [4] LEE C. *et al.* (2022), "Tutorial on metalenses for advanced flat optics: design, fabrication & critical considerations", *Journal of Applied Physics*, DOI :10.1063/5.0078804.
- [5] <https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/t4458.html>
- [6] <https://www.usine-digitale.fr/article/meta-et-essilorluxottica-lancent-leurs-nouvelles-lunettes-connectees-ray-ban-meta.N2175757>
- [7] KRESS B. (2020), *Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets*, SPIE Press, Bellingham, Washington, January.
- [8] <https://centerfreeformoptics.org/>
- [9] THOMPSON K. P. *et al.* (2012), "Freeform optical surfaces: a revolution in imaging optical design", *Optics and Photonics News*, vol. 23, Issue 6, pp. 30-35.



- [10] NIKOLOV D.K. *et al.* (2021), “Metaform optics: bridging nanophotonics & freeform optics”, *Science Advance*, vol 7, Issue 18, DOI : 10.1126/SCIADV.ABE5112.
- [11] BENISTY H., GREFFET J-Y & LALANNE PH. (2024), *Introduction to nanophotonics*, Oxford University Press.
- [12] McMANAMON P. F. *et al.* (2009), “A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems”, *Proc. IEEE*, 97(6), pp. 1078-1096.
- [13] GOPAKUMAR M. *et al.* (2024), “Full-color 3D holographic augmented reality displays with metasurface wave guides”, *Nature*, 629(8013), pp. 1-7.
- [14] ZHUO W. *et al.* (2020), “A review of high-efficiency Pancharatnam-Berry metasurfaces”, *Terahertz Science & Technology*, vol. 13, n°3, pp. 73-89.
- [15] DOLAN J. *et al.* (2021), “Broadband liquid crystal tunable metasurfaces in the visible: liquid crystal inhomogeneities across the metasurface parameter space”, *ACS Photonics*, 8(2), DOI : 10.1021/acsp Photonics.0c01599.
- [16] PARK Y.-W. *et al.* (2021), “Meta-optics achieves RGB achromatic focusing for virtual reality”, *Sciences Adv.*, 7, eabe4458, DOI :10.1126/sciadv.abe4458.
- [17] LI Z. *et al.* (2022), “Empowering metasurfaces with inverse design: principle and applications”, *ACS Photonics*, vol. 9, Issue 7, pp. 2178-2192.
- [18] KRESS B. & MEYRUEIS P. (2007), *Applied digital optics: from microoptics to nanophotonics*, 1<sup>st</sup> edition, John Wiley and Sons, New-York.
- [19] Par exemple voir : <https://holoeye.com/>
- [20] HE X. (2024), “Holographic projections: the future of automotive heads-up displays”, IDTechEx Reports, April 17.
- [21] LIN J. *et al.* (2016), “Retinal projection head-mounted display”, *Frontier of Optoelectron*, DOI : 10.1007/s12200-016-0662-8.
- [22] YANG X. *et al.* (2019), “A fast computer-generated holographic method for VR and AR near-eye 3D display”, *Applied Science*, 9i (19), 4164, doi.org/10.3390/app9194164.
- [23] MARTINEZ C. *et al.* (2023), “Sparse holographic imaging for an integrated AR near-eye display”, *Applied Optics*, vol. 62, n°8, March.
- [24] ZHANG J. *et al.* (2022), “Smart soft contact lenses for continuous 24-hour monitoring of intraocular pressure in glaucoma care”, *Nature Com*, vol. 13, n°5518.
- [25] ZHANG S. *et al.* (2023), “Research progress of micro-LED display technology”, *Crystals*, 13(7), 1001, <https://doi.org/10.3390/cryst13071001>.
- [26] TREMBLAY E. J. *et al.* (2013), “Switchable telescopic contact lens”, *Optics Express*, vol. 21, Issue 13, pp. 15980-15986.
- [27] KHALDI A. *et al.* (2020), “The cyclops contact lens: a laser emitting contact lens for eye tracking”, *Nature Scientific Report*, vol. 10, 14804.
- [28] DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE J.-L. (2024), “Novel smart contact lens eye assistants”, Invited speaker at Gordon Research Conference Image Science, Maine, June.
- [29] NOURRIT V. *et al.* (2021), “Perifoveal retinal augmented reality (PRAR) on contact lenses”, *Optical Engineering*, 60(11), 115102, <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.11.115102>