

Contexte initial du stockage par pages de données

La première approche développée pour aboutir à un démonstrateur de mémoire holographique de grande capacité a consisté en une architecture dite “sans pièce mobile”, où le milieu d’enregistrement est fixe et la restitution de l’information stockée se fait sans mouvement mécanique, par opposition aux architectures présentant un disque en rotation et/ou une tête de lecture en translation. Ceci doit garantir un débit de lecture élevé et la capacité importante recherchée nécessite le multiplexage du plus grand nombre possible N de pages de données (cf figure 1.8), la motivation principale sous-jacente étant la très haute

densité d'information théorique maximale de l'ordre de $1/(n\lambda)^3$ prédite pour le stockage holographique.

Pour développer l'architecture de mémoire "sans pièce mobile", l'approche communément retenue a consisté à utiliser un cristal photoréfractif de volume proche de 1 cm^3 comme milieu holographique et à y multiplexer les pages de données angulairement ou par codage en phase. Ces deux types de multiplexage peuvent en effet être mis en oeuvre sans mouvement mécanique coûteux en temps de réponse, dans le cas du codage en phase par simple changement du motif affiché sur le SLM [Alves 94], et dans celui du codage angulaire par exemple en utilisant un modulateur acousto-optique pour orienter le faisceau de référence [Hong 95].

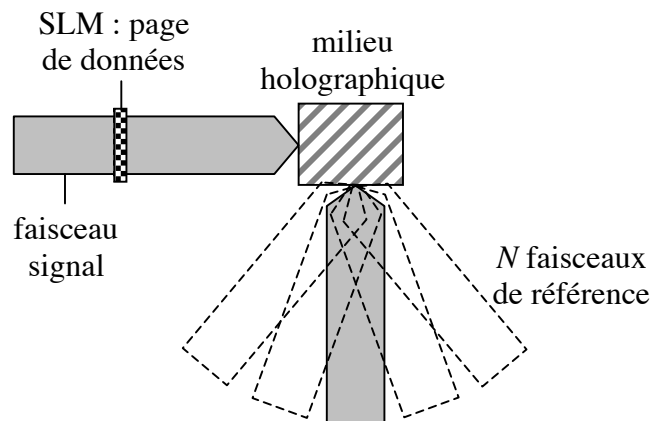


figure 1.8 : schéma de principe de la mémoire holographique "sans pièce mobile"

Toutefois, la pile d'hologrammes multiplexés par ces méthodes ne permet pas d'excéder des capacités de quelques gigabits, le nombre d'hologrammes pouvant difficilement dépasser le millier [Mok 93, Burr 01]. Dans des cristaux d'épaisseur proche du centimètre, ces techniques de multiplexage peuvent adresser plusieurs milliers d'hologrammes avant que les limites géométriques du montage ne se fassent sentir. C'est en revanche plus au niveau de l'efficacité de diffraction minimale requise par hologramme que la contrainte se situe, du fait des dynamiques holographiques pas assez importantes permises par les cristaux photoréfractifs. Des débits de lecture très élevés de l'ordre du Gbit/s ont ainsi été démontrés, mais pour de faibles densités surfaciques D_{3D} inférieures à $1 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ [Shelby 97]. Avec des débits plus faibles, les densités surfaciques de données peuvent devenir très élevées, de l'ordre de $300 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ [Burr 01], mais l'obtention de mémoires de grandes capacités doit passer par la multiplication des piles d'hologrammes à des positions adjacentes au sein du milieu d'enregistrement. Du fait des tailles limitées des cristaux photoréfractifs et de l'absence de positionnement mécanique, l'approche de mémoire "sans pièce mobile" semble

peu adaptée au stockage d'un nombre important de piles d'hologrammes. C'est donc dans ce contexte que l'architecture du disque holographique a pris son essor.

2. Le disque holographique à pages de données

Avec l'émergence des photopolymères comme milieux d'enregistrement s'est développée l'architecture de mémoire holographique se présentant sous la forme d'un disque de taille standard, type CD/DVD, où la couche de données est d'épaisseur millimétrique. Cette approche est actuellement la plus répandue, et l'obtention de capacités de stockage importantes est dans ce cas visée par la juxtaposition de piles d'hologrammes multiplexés sur toute la surface du disque (cf figure 1.9).

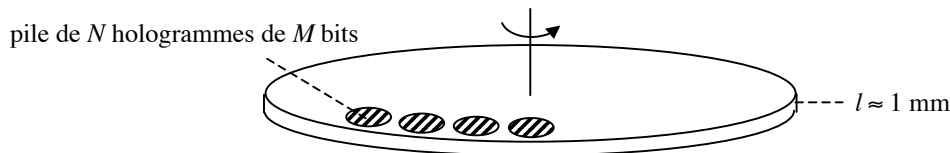


figure 1.9 : schéma de principe d'un disque holographique

Avec ce type d'architecture, la limitation principale face à cet objectif ne réside plus dans les dynamiques accessibles par le matériau d'enregistrement mais plutôt dans la géométrie elle-même de la mémoire et ses répercussions sur le multiplexage à haute densité d'hologrammes. Il se trouve en effet que l'augmentation de la capacité du disque par un accroissement de son épaisseur n'est plus possible au delà d'une certaine limite avec les méthodes de multiplexage conventionnelles basées sur la sélectivité de Bragg [Li 94, Barbastathis 96, Steckman 01]. Ce comportement peut être appréhendé par l'explication simplifiée suivante, adaptée au cas représentatif du multiplexage angulaire (cf figure 1.10). L'image du SLM dans le matériau est focalisée dans un plan unique du volume d'enregistrement, au delà duquel le faisceau signal diverge. En considérant un faisceau signal gaussien, son rayon $w(z)$ en fonction de sa position dans l'épaisseur est donné par la formule classique :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \quad (1.43)$$

où w_0 est le col du faisceau dans le plan image et z_0 la zone de Rayleigh correspondante, donnée par la relation :

$$z_0 = \frac{\pi n w_0^2}{\lambda} \quad (1.44)$$

avec n l'indice du milieu et λ la longueur d'onde du faisceau. Pour une épaisseur l suffisamment grande devant z_0 , l'aire occupée à la surface du matériau par ce faisceau est donc proportionnelle à l^2 , et comme d'après (1.28) le nombre d'hologrammes multiplexables dans une pile est proportionnel à l , la densité surfacique de données décroît donc au final avec l'épaisseur. Même avec une longueur d'onde de 400 nm, une épaisseur d'un centimètre, et le couplage d'un multiplexage basé sur la sélectivité de Bragg avec un multiplexage fractal, la densité surfacique théorique peut ainsi difficilement atteindre 500 bits/ μm^2 , alors que pour un millimètre elle peut déjà dépasser 300 bits/ μm^2 . Même s'il est possible de s'en rapprocher, le teraoctet est donc hors d'atteinte de cette manière sur un disque de taille standard.

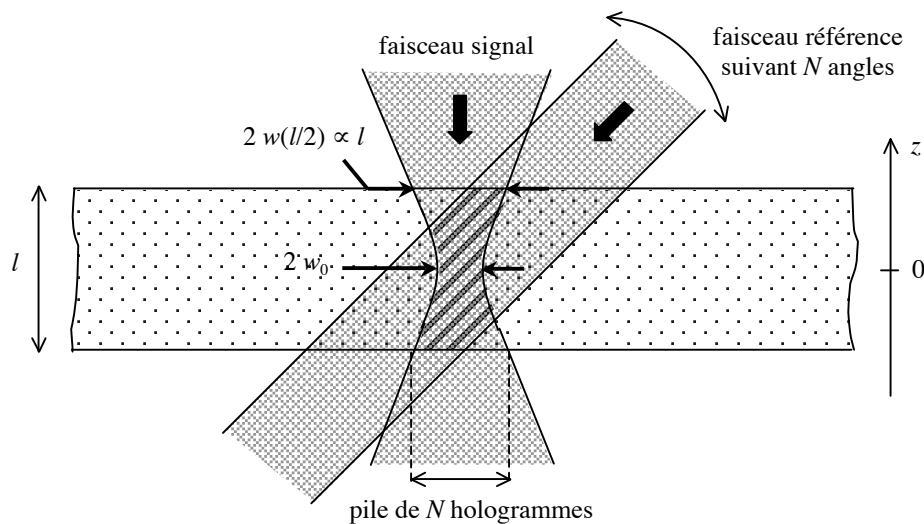


figure 1.10 : géométrie d'enregistrement d'un disque holographique épais

Afin de dépasser ces limites géométriques, deux approches distinctes développées séparément par les sociétés InPhase Technologies et Optware se démarquent actuellement.

InPhase Technologies propose ainsi de combiner le multiplexage angulaire avec une méthode permettant de superposer en partie les piles d'hologrammes obtenues. Celle-ci rend en effet possible la lecture indépendante de chaque pile dans une telle configuration grâce à un système comportant une ouverture qui bloque les signaux provenant des piles adjacentes [Anderson 04, Wilson 04]. En utilisant un photopolymère sensible à 407 nm et d'épaisseur typique 1,5 mm, il est ainsi attendu que la capacité d'un disque puisse excéder le teraoctet. Il a été annoncé en avril 2005 sur le site internet de la société qu'une densité surfacique de l'ordre de 300 bits/ μm^2 a d'ores et déjà été obtenue en pratique grâce à cette approche et qu'une première génération de systèmes d'enregistrement-lecture de disques holographiques de

300 Go serait disponible commercialement en 2006, avant d'atteindre graduellement des capacités de 1,6 To pour 2009.

De son côté, la société japonaise Optware met en avant une technique dite d'holographie colinéaire qui permettrait à la fois d'augmenter la capacité tout en relaxant les tolérances de fonctionnement de la mémoire par un schéma optique simplifié [Horimai 04, Horimai 05]. L'architecture proposée permet de faire interférer par une lentille de focalisation des faisceaux de référence et signal possédant le même axe optique, perpendiculaire au milieu holographique, celui-ci étant placé sur une surface réfléchissante. Ceci permet un multiplexage par translation à la fois selon les directions radiale et tangentielle du disque. Une capacité maximale par disque proche de 4 To est visée, et du fait de l'intégration dans le système d'un asservissement optique en position du disque, la compatibilité avec les stockages surfaciques de type CD/DVD serait améliorée. Il est toutefois à noter qu'aucune explication détaillée du principe de stockage par holographie colinéaire n'a à notre connaissance été donnée, et la société Optware reste en outre assez vague sur la densité surfacique de données obtenue en pratique à ce jour, qui semble être toutefois de l'ordre de $100 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ au vu des informations fournies à ce jour sur son site internet.

Pour ce qui concerne les débits de lecture accessibles par un disque holographique, des performances supérieures à 1 Gbit/s ont été reportées avec des pages de 10^6 bits sur un disque photopolymère de $200 \mu\text{m}$ d'épaisseur, ceci pour une densité surfacique toutefois modeste de $10 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ obtenue avec un multiplexage par corrélation [Orlov 04]. Il n'a au bout du compte à notre connaissance pas encore été reporté clairement de démonstrateur de stockage holographique combinant un débit de lecture de l'ordre du Gbit/s avec des densités surfaciques excédant $100 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$.

B. Le stockage holographique bit à bit

Le stockage holographique par pages de données sur un disque précédemment présenté possède des attraits certains. Ce format d'hologramme est en effet particulièrement adapté à l'obtention de hauts débits de lecture, et les avancées technologiques de la dernière décennie ont permis de réduire de manière importante le coût des composants nécessaires correspondants, comme les SLM à cristaux liquides ferroélectriques et les matrices de détecteurs CMOS. Le coût et la complexité d'une telle approche restent cependant supérieurs à ceux des plate-forme traditionnelles de stockage optique, et leur compatibilité semble en outre impossible de manière immédiate. En ajoutant à cela le fait qu'une capacité de 1 To sur un disque reste conceptuellement difficile à atteindre de cette manière, il semble donc

avantageux de développer d'autres approches ayant des performances similaires mais une compatibilité accrue avec le stockage surfacique. Dans ce contexte, le stockage holographique bit à bit utilise des hologrammes codant pour un seul bit et se rencontre principalement sous les deux formes présentées ci-dessous.

1. Le stockage par microréseaux de Bragg

Une première possibilité consiste à stocker dans un disque des hologrammes sous forme de microréseaux de Bragg, chacun d'eux codant pour un seul bit [Orlic 01, Orlic 04, McLeod 05]. Ces réseaux sont enregistrés au col de deux faisceaux contre-propageants focalisés, et sont typiquement inclus dans des volumes cylindriques de quelques microns de hauteur pour un micron de diamètre. Pour atteindre des capacités élevées, ils sont multiplexés en longueur d'onde et/ou disposés sur plusieurs niveaux dans l'épaisseur du milieu holographique (cf figure 1.11).

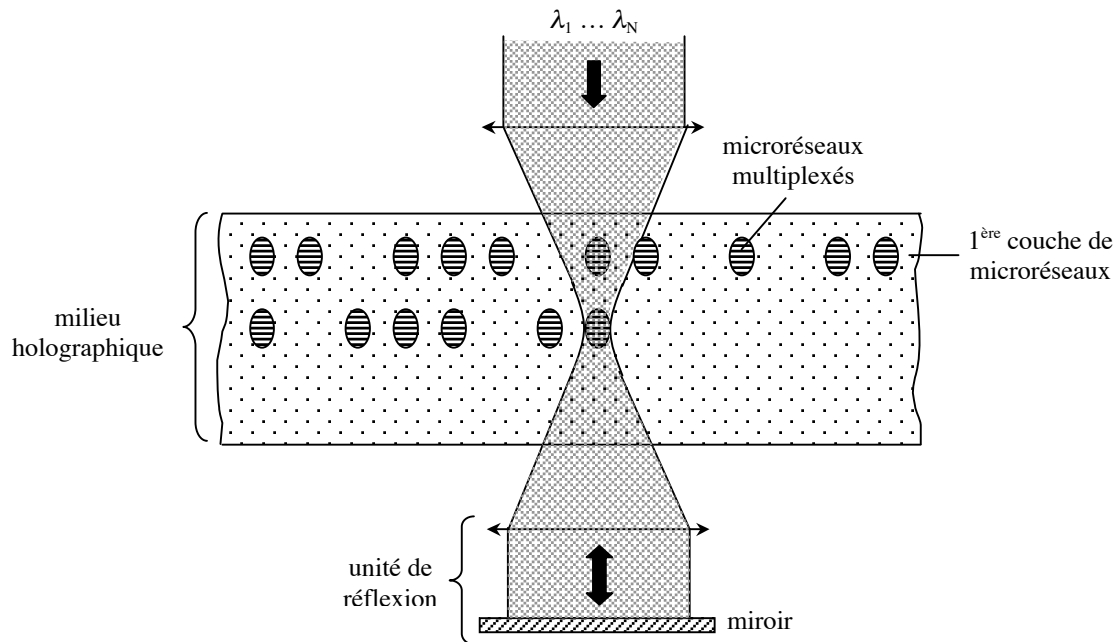


figure 1.11 : enregistrement de couches de microréseaux multiplexés en longueur d'onde

Tout comme pour le stockage optique conventionnel de surface, l'écriture et la lecture sont effectuées par un faisceau focalisé en incidence normale sur le milieu holographique, ce faisceau contenant les différentes longueurs d'onde désirées pour permettre un enregistrement et une lecture en parallèle. A l'écriture, le faisceau contre-propageant est le plus souvent généré grâce à l'activation d'une unité de réflexion placée de l'autre côté du disque. Lors de la lecture, une réflexion de Bragg du faisceau incident à une longueur d'onde donnée indique la présence d'un réseau et peut donc coder pour un niveau logique "1" ou "0". De plus, comme

ces réseaux sont essentiellement enregistrés dans la profondeur de champ des faisceaux, où les franges d'interférence peuvent être considérées comme planes, leurs largeurs peuvent être ajustées en utilisant la rotation du disque pour former des pistes semblables à celles des DVD, et un codage des données similaire basé sur les transitions de réflectivité peut donc être envisagé pour maximiser la capacité et accroître la fiabilité de la lecture. Il est également à noter qu'outre la possibilité du multiplexage, l'intérêt des microréseaux par rapport à un stockage volumique point à point non holographique réside dans l'efficacité bien plus importante de la diffraction pour générer des signaux réfléchis détectables [McLeod 05]. Enfin, cette architecture permet l'utilisation d'une tête d'écriture-lecture légère dérivée de celles employées pour les DVD : ceci autorise un temps d'accès plus rapide à une zone radiale donnée du disque en comparaison du stockage par pages, où un SLM et l'optique correspondante sont inclus dans la tête.

L'enregistrement et la lecture de microréseaux multiplexés selon trois longueurs d'onde pour une monocouche de photopolymère de $15\ \mu\text{m}$ d'épaisseur ont ainsi été présentés [Orlic 01]. La disposition des microréseaux selon plusieurs couches pour une unique longueur d'onde de $532\ \text{nm}$ a également été validée expérimentalement, avec dans un photopolymère de $125\ \mu\text{m}$ d'épaisseur 12 couches de densité surfacique proche de $1\ \text{bit}/\mu\text{m}^2$ lues à un débit d'environ $20\ \text{Mbits/s}$ [McLeod 05]. La diaphonie à la lecture d'une couche due aux perturbations engendrées par les autres couches et le bruit de diffusion ont été dans ce cas limités grâce à une ouverture confocale placée devant le photodétecteur qui atténue fortement la lumière qui n'est pas générée dans la profondeur de champ du faisceau incident. La faible absorption des photopolymères paraît compatible avec l'enregistrement de quelques centaines de couches dans un matériau d'épaisseur millimétrique. Les spécifications de la prochaine génération de disques surfaciques Blu-Ray, à savoir une longueur d'onde de $405\ \text{nm}$ et une ouverture numérique de la lentille de focalisation de $0,85$, permettraient ainsi une capacité théorique proche du teraoctet pour un tel disque multicouche à microréseaux. Avec une seule longueur d'onde, les débits d'écriture et de lecture prévisibles de cette approche sont en revanche inférieurs à ceux permis par le parallélisme de l'approche par pages. Du fait de la taille restreinte des microréseaux, leur sélectivité de Bragg est peu résolue et la dynamique d'une couche du matériau est limitée, ce qui rend difficilement envisageable de multiplexer plus d'une dizaine de longueurs d'onde. Pour un matériau comme les photopolymères où la variation d'indice en fonction de l'énergie lumineuse reçue ne présente pas de seuil d'activation marqué, il faut en outre tenir compte du fait que l'énergie n'est pas uniquement absorbée au col des faisceaux pour inscrire un réseau, mais également dans toute l'épaisseur

du disque. Il est ainsi possible de montrer que la dose d'énergie utilisée pour inscrire les données dans l'ensemble d'une des couches est également absorbée de manière à peu près uniforme dans chacune des autres couches [McLeod 05]. La variation d'indice accessible dans chaque couche est ainsi environ inversement proportionnelle au nombre total de couches enregistrées, et la majeure partie de la dynamique du matériau est donc localement consommée sans qu'aucune donnée ne soit inscrite, ce qui semble peu optimal.

2. L'approche par réseaux de Bragg microfibrés

Une deuxième approche plus prospective utilisant des réseaux de Bragg codant pour un bit est basée sur une couche de données qui a été structurée lors d'une étape de formatage en une matrice de microfibres photosensibles perpendiculaires à la surface du disque [Labeyrie 98]. Les réseaux multiplexés en longueur d'onde sont enregistrés dans chaque microfibre par des faisceaux contrepropageants focalisés à ses extrémités (cf figure 1.12). Lors de la lecture, un unique faisceau incident est utilisé pour générer des réflexions de Bragg sur les réseaux présents dans la fibre, l'absence ou la présence d'une réflexion à une longueur d'onde donnée pouvant coder respectivement pour un état logique "0" ou "1". Pour éviter la diaphonie entre les différentes longueurs d'onde utilisées, il est nécessaire que les microfibres soient monomodes. En effet, dans des fibres multimodes, l'enregistrement avec un faisceau d'une longueur d'onde dans le vide donnée conduirait à la création de plusieurs réseaux dont les périodes correspondent aux différentes constantes de propagation des modes de ces fibres. Le caractère monomode implique ainsi des diamètres de fibres typiques de $0,5 \mu\text{m}$ dans les longueurs d'onde visibles.

Pour effectuer une première validation de ce principe de stockage, la référence ci-dessus présente un réseau de microfibres créé par une figure d'interférence adaptée entre 4 faisceaux dans un photopolymère d'épaisseur $60 \mu\text{m}$. Des réseaux de Bragg correspondant aux différentes raies d'un laser Argon sont inscrits dans ces fibres simultanément à leur création grâce à un faisceau supplémentaire contrepropageant. Des réflexions de Bragg correspondant aux différentes raies ont ainsi été observées en sondant une des microfibres en lumière blanche. Un aspect particulièrement attrayant de cette architecture microfibrée est que du fait du confinement de la lumière dans les microfibres, la capacité devrait être proportionnelle à l'épaisseur du disque. Par ailleurs, une capacité disque de 1 teraoctet a été estimée théoriquement avec le multiplexage de 500 réseaux pour des longueurs d'onde couvrant la gamme de 400 à 440 nm dans des microfibres de 1 mm de long [Labeyrie 04].

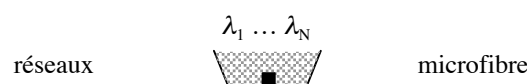


figure 1.12 : enregistrement de réseaux multiplexés en longueur d'onde dans une couche microfibrée

Tout comme l'approche précédente utilisant des microréseaux, l'architecture microfibrée conserve la simplicité d'un montage optique dérivé de celui du stockage surfacique actuel. Ces deux approches ont certes des contraintes de positionnement plus importantes que pour le cas des pages de données, vu les diamètres de l'ordre du micron des réseaux, mais elles sont aussi moins sensibles à un rétreint uniforme du matériau puisqu'un simple décalage en longueur d'onde à la lecture leur permet de rétablir les efficacités de diffraction maximales des réseaux. Par rapport aux cas des microréseaux, l'approche microfibrée introduit en plus un degré de parallélisme plus important dans les procédures d'écriture et de lecture par le multiplexage d'un grand nombre de longueurs d'onde. La répllication de masse des réseaux microfibrés pourrait être possible en adaptant les techniques utilisées industriellement pour copier les hologrammes enregistrés en configuration de réflexion [Tipton 94]. De nombreux points restent toutefois à valider pour cette approche, dont entre autres la structuration en microfibres sur des épaisseurs de l'ordre du millimètre, la détermination d'une source multi-longueurs d'onde adaptée à un multiplexage poussé et l'utilisation d'un matériau photosensible adéquat incorporé dans la structure microfibrée pour l'enregistrement des réseaux.

Conclusion

Le stockage holographique semble être actuellement la voie la plus prometteuse pour atteindre des capacités de l'ordre du teraoctet sur un disque amovible, les autres axes de recherche étudiés dans ce contexte étant essentiellement les multi-couches de données selon le

format actuel, le stockage en champ proche optique et celui impliquant des effets dits de "super-résolution" [Bechevet 05]. L'investissement de sociétés européennes dans le stockage holographique est ainsi lui aussi initié suite aux résultats reportés aux Etats-Unis et au Japon, avec par exemple Thomson et Philips [Richter 04, Cromptvoets 05]. L'état de l'art du stockage holographique présenté dans cette partie n'est bien entendu pas exhaustif et s'est surtout focalisé sur les potentialités de cette méthode pour aboutir à un support de données inscriptible une fois (WORM), voire réinscriptible, de capacité disque proche du teraoctet et débit de lecture de l'ordre de 1 Gbit/s. D'autres applications cibles sont bien sûr étudiées pour le stockage holographique. Un premier exemple concerne son utilisation pour le cryptage de données : un dispositif de stockage holographique utilisant une carte de données basée sur un film mince de polymère dopé par des molécules photo-isomérisables a ainsi été réalisé au Département de Physique Atomique de l'Université de Budapest de Technologie et d'Economie, en partenariat avec la société Optilink [Ujvari 04, Kerekes 02]. Un autre exemple d'application concerne les supports de données miniaturisés et bon marché de type ROM (Read Only Memory), des travaux ayant été réalisés en ce sens par la société japonaise NTT [Imai 03].

Au bout du compte, seuls les photopolymères semblent actuellement pouvoir mener à un support de stockage holographique commercial combinant capacité et débits très importants, l'architecture de stockage privilégiée étant celle par pages de données sur disque. Ceci limite donc la mémoire à un usage WORM, avec un matériau qui comme nous l'avons mentionné plus haut possède plusieurs inconvénients pratiques, et un principe de stockage dont l'extension en capacité au teraoctet sur disque demeure non immédiate et pas encore acquise. Des solutions en ce sens sont toutefois proposées par les sociétés InPhase Technologies et Optware, mais leurs efficacités restent encore à prouver. Dans ce contexte, les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans l'élaboration d'une architecture de mémoire holographique permettant un usage réinscriptible, une compatibilité accrue avec les supports optiques surfaciques, et bien entendu des performances les plus élevées possible en terme de capacité disque et de débit de lecture. La présentation de cette architecture est ainsi l'objet du chapitre suivant.