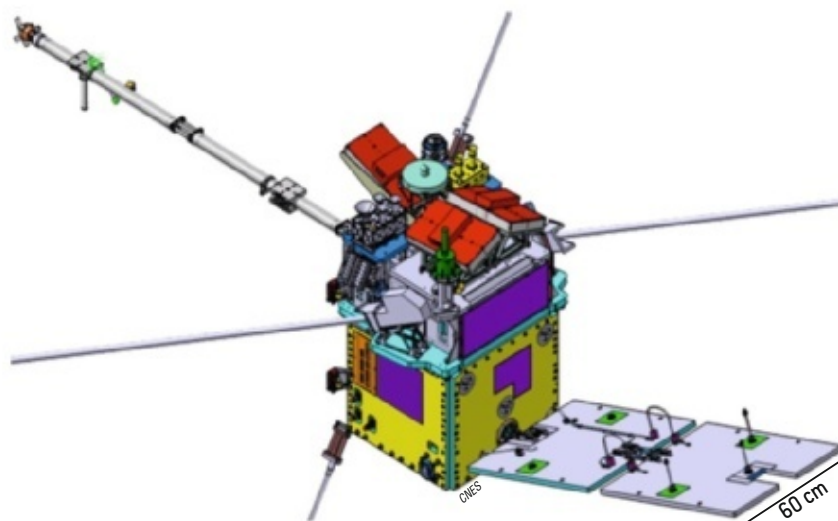


pour déclencher des flashes gamma de haute énergie. De tels processus pourraient être des sources alternatives des flashes gamma d'origine terrestre observés pendant les orages, qu'ils soient déclenchés dans les filaments ionisés des sylphes ou dans les éclairs. Reste à le vérifier... et à comprendre comment des électrons atteignent de telles énergies.

Enfin, toujours en janvier 2011, le télescope spatial de rayonnement gamma *Fermi* a détecté des flashes gamma d'origine terrestre de 511 kiloelectronvolts – une énergie qui correspond très exactement à celle des photons produits lors de la collision et l'annihilation d'un électron et de son antiparticule, le positron. Cette découverte suggère que les orages engendrent la formation... d'antiparticules. L'avalanche d'électrons émet tellement de flashes gamma lors des collisions avec les molécules de l'air que suffisamment de paires électron-positron sont produites lors de l'interaction des rayons gamma avec les molécules de l'air pour que leur signature – le rayon gamma fruit de leur annihilation – soit détectée par le satellite.

Jusqu'à présent, tant pour l'étude des événements lumineux transitoires que pour celle des flashes gamma d'origine terrestre, on s'est contenté de données partielles – des observations d'un aspect particulier, parfois au détour d'une expérience visant d'autres objectifs. Pour mieux comprendre les mécanismes en jeu, notre équipe a proposé, dès 1998, d'effectuer des observations simultanées, depuis l'espace, de l'ensemble des émissions, ce qui représente un défi, car, vus de l'espace, les sylphes se superposent aux éclairs d'orage qui saturant les caméras.

La première expérience d'observation de sylphes par satellite, lancée en 2004 pour cinq ans, était limitée à des observations optiques à l'horizon. Placée à bord du satellite taïwanais FORMOSAT 2, ISUAL a détecté de nombreux elfes, sylphes, halos et jets géants, dont la distribution géographique a été établie. Les elfes ont été principalement observés au-dessus des océans dont la température dépasse 26 °C, alors que les sylphes se produisent plutôt au-dessus des continents. La formation des elfes serait favorisée par la température élevée de certaines zones océaniques : cette température provoque des phénomènes de convection verticale qui favorisent les éclairs intenses, lesquels entraînent à leur tour la formation des elfes.



5. LE MICROSATELLITE TARANIS est équipé de différents instruments pointés vers le sol qui enregistreront en parallèle les événements lumineux transitoires, les flashes gamma d'origine terrestre ainsi que les particules énergétiques venant des basses couches atmosphériques. Actuellement en construction (le lancement est prévu pour 2015), le satellite couvrira une très large gamme spectrale (rayons gamma, rayons X, ultraviolet, visible, proche infrarouge et radio).

Le projet TARANIS du programme *Myriade* du CNES, proposé par des équipes du CNRS et la nôtre, a pour objectif la mesure simultanée des flashes gamma d'origine terrestre, des événements lumineux transitoires, des émissions radio et des électrons de haute énergie à partir du même microsatellite. Nous pourrions ainsi, d'une part, décrire les mécanismes de déclenchement et, d'autre part, déterminer leur fréquence et leur impact sur l'environnement terrestre. Ces mesures doivent être effectuées depuis l'espace, car l'atténuation des flashes gamma d'origine terrestre dans l'atmosphère les rend difficilement observables du sol.

La mission TARANIS

Pour surmonter la difficulté d'observer les sylphes au-dessus des orages, nous avons proposé d'utiliser deux caméras, filmant l'une les éclairs à une fréquence correspondant à une raie d'émission des éclairs et l'autre les sylphes à une fréquence correspondant à une raie d'émission des sylphes. Il n'est pas possible de séparer les raies d'émission des sylphes et des éclairs, car elles sont produites par les mêmes molécules (l'azote et l'oxygène de l'atmosphère). Néanmoins, on peut les distinguer en observant les sylphes dans une raie d'émission (environ 762 nanomètres) correspondant à une bande d'absorption de l'atmosphère due au dioxygène. Dans cette raie, les émissions des éclairs sont davantage absorbées que celles des sylphes qui se produisent à plus haute altitude (où il y a moins d'oxygène). En utilisant deux caméras, l'une qui se trouve dans cette

bande et une autre qui privilégie les éclairs, il est possible de séparer, par traitement au sol, la réponse des sylphes de celle des éclairs. Ce procédé a été validé par l'expérience LSO (*Lightning and Sprite Observations*), pilotée dans les années 2001 à 2004 par Claudie Haigneré et d'autres astronautes de l'Agence spatiale européenne sur la Station spatiale internationale.

Actuellement en construction, le satellite TARANIS doit être lancé en 2015. Sa charge utile inclut des instruments optiques, des détecteurs d'électrons de haute énergie, des antennes électriques et magnétiques couvrant une gamme de fréquences très étendue et trois détecteurs de rayons X et gamma. Bénéficiant d'un mode d'observation des événements transitoires à haute résolution et d'un mode de surveillance fonctionnant en continu, TARANIS pourra caractériser l'ensemble des phénomènes à toutes les échelles temporelles possibles.

D'autres projets spatiaux, également en phase de construction, ont des objectifs similaires : le projet ASIM vise à observer les flashes gamma d'origine terrestre et les événements lumineux transitoires sur la Station spatiale internationale en liaison avec les paramètres climatiques, tandis que le projet GLIMS, également depuis la Station spatiale internationale, dispose de dispositifs optiques pour observer les événements lumineux transitoires tout en mesurant simultanément des émissions radio de très haute fréquence.

Les prochaines années devraient ainsi fournir les observations nécessaires pour mieux comprendre ces aspects nouveaux de l'activité orageuse, ainsi que l'effet de ces émissions variées sur l'environnement. ■

Cinéma

La conquête de la 3D

Depuis quelques années, les films en trois dimensions remportent un franc succès. Comment recrée-t-on l'illusion du relief à partir d'images projetées sur un écran bidimensionnel ?

Thierry Borel

Je ne pense pas qu'il y ait un sujet de film qui ne puisse pas absorber la 3D, qui ne puisse pas tolérer l'ajout de la profondeur comme technique de narration.

Martin Scorsese

Après plusieurs tentatives infructueuses dans les années 1950 et 1980, le cinéma en trois dimensions est de retour depuis le milieu des années 2000. Cette fois, grâce à l'emploi de technologies numériques, le succès est au rendez-vous. La plupart des histoires peuvent se raconter en 3D, mais le passage à ce format n'est pas une simple évolution, comme le fut la transition du noir et blanc à la couleur ; d'une part, c'est une nouvelle façon de faire vivre les émotions et de raconter une histoire et, d'autre part, un contenu 3D peut susciter une gêne physiologique chez le spectateur. Créer et restituer un contenu 3D de qualité implique alors de respecter un certain nombre de règles, tant sur le plan de la technique que du scénario.

Après un bref historique du domaine, nous présenterons toute la chaîne de l'image, du tournage à la projection dans les salles de cinéma. Nous évoquerons ensuite la télévision en relief et la 3D sans lunettes.



Précisons d'abord ce qu'est la 3D. Pour les amateurs de jeux vidéo, il s'agit d'une représentation d'un monde à trois dimensions où l'on peut se déplacer, mais dont on observe une projection sur un écran à deux dimensions. Cette technique est aussi utilisée dans les films d'animation numériques et dans les systèmes de conception assistée par ordinateur. Il n'y a pas d'effet de relief ni de jaillissement d'objets hors de l'écran.

Nous nous intéressons ici à la visualisation en trois dimensions, aussi nommée stéréoscopie 3D (S-3D), qui crée des effets de profondeur. Dans le monde réel, chaque œil voit une même scène sous un angle légèrement différent, et le cerveau reconstitue le relief à partir de ces images un peu décalées. La stéréoscopie 3D reproduit ce phénomène, en projetant des images légèrement différentes sur chaque œil. Cette idée n'est pas nouvelle. Les premières expériences de cinéma stéréoscopique datent de plus d'un siècle, avec un procédé nommé

anaglyphe inventé par le Français Louis Ducos du Hauron en 1891 : deux images différentes d'une même scène, respectivement rouge et verte, sont projetées sur un écran, tandis que le spectateur porte des lunettes ayant deux verres de couleurs différentes (rouge et verte). On a utilisé ce procédé jusque dans les années 1950, première période phare du cinéma en relief.

L'engouement, puis la désillusion

À cette époque, un nouveau procédé, fondé sur des lunettes polarisées, est introduit : les images gauches et droites ne sont plus de couleurs différentes, mais leur lumière a une polarisation spécifique (une orientation particulière du champ électrique), et les verres placés devant chaque œil sont des filtres polarisés.

À Hollywood, le cinéma en relief suscite un engouement, mais bref. Les images gauches et droites, projetées par deux appa-

reils différents, doivent être parfaitement superposées et synchronisées sur l'écran, car tout décalage provoque des maux de têtes ou des nausées. Mais le jeu mécanique dans les projecteurs rend ces deux contraintes irréalisables. En outre, la prolifération de créatures plus ou moins monstrueuses jaillissant de l'écran accentue la fatigue oculaire du spectateur.

En raison de ces problèmes, le cinéma 3D ne réussit pas à percer. Il ne reviendra sur le devant de la scène que dans les années 1970-1980, principalement avec la technique des lunettes polarisées ; mais là encore, les spectateurs ressentent de l'inconfort et les films ne rencontrent pas le succès espéré. La 3D se replie alors vers les parcs d'attraction, où les séances ne durent que quelques minutes, de sorte que la fatigue visuelle n'a pas le temps de se faire sentir.

Le changement déterminant sera l'arrivée du cinéma numérique dans les années 2000. Celui-ci permet de n'utiliser qu'un seul appareil pour projeter les deux



AVEC LE FILM AVATAR, sorti fin 2009, la 3D s'est imposée au cinéma.

L'ESSENTIEL

✓ Chacun de nos yeux voit une même scène sous un angle distinct. Le cerveau reçoit donc deux images différentes, à partir desquelles il recrée une représentation en relief.

✓ Pour tourner un film en trois dimensions, on utilise alors deux caméras, afin d'enregistrer une vue distincte pour chaque œil.

✓ Différentes techniques de projection permettent ensuite de présenter à chaque œil uniquement la vue qui lui est destinée.

✓ Un certain nombre de règles doivent être respectées, sinon les spectateurs ressentent des fatigues visuelles, des maux de tête et des nausées.

© 20th Century Fox



Thierry BOREL est ingénieur de recherche pour la Société Technicolor, à Cesson-Sévigné, en Bretagne, et membre du Programme d'excellence 3D de cette société.

images – nous y reviendrons. Le premier succès de la 3D, *Chicken Little*, des studios Disney, sort en 2005, mais il faudra attendre *Avatar* de James Cameron, fin 2009, pour que la 3D déclenche un réel engouement. Le cinéma d'animation contribue notablement au déploiement rapide de la 3D : les trois quarts des films 3D des années 2000 en sont issus. Les images créées par ordinateur sont techniquement parfaites, notamment parce que les images gauches et droites ne présentent ni différence de colorimétrie ni distorsions géométriques. Autre avantage des films d'animation, aucun système compliqué d'acquisition à deux caméras n'est nécessaire.

Ce rapide historique met en exergue la notion clef de confort de visualisation. Une maîtrise insuffisante de certaines règles de production peut entraîner des fatigues oculaires, des maux de têtes ou des nausées. En outre, nous ne percevons pas tous un contenu stéréoscopique de la même façon. Cinq pour cent de la population ne voient pas le relief lorsqu'elle est exposée à ce type de contenu et 20 pour cent de la population le voient différemment : par exemple, certaines personnes ne perçoivent pas les sujets qui « sortent » de l'écran. Pour créer un contenu 3D de qualité, il est primordial de bien comprendre le fonctionnement du système visuel humain.

Lorsque le regard se fixe sur un objet, deux phénomènes se déroulent simultanément, chacun assuré par des muscles spécifiques : la mise au point (ou accommodation) et la convergence. La mise au point est une déformation du cristallin (qui joue le rôle de lentille convergente) ; les rayons lumineux sont alors focalisés sur la rétine, de sorte que l'image est nette. La convergence est un mouvement latéral des globes oculaires : ils se tournent vers l'objet, afin que leurs axes optiques se croisent à son niveau.

La lumière issue de l'objet est ensuite transformée en influx nerveux, qui sont transportés jusqu'au cortex visuel, dans la partie postérieure du cerveau. Les influx y sont analysés avec d'autres informations, telle l'intensité des contractions des muscles oculaires assurant la convergence et la mise au point, ce qui crée une représentation de l'espace environnant en couleur et en volume.

Avec l'accommodation, la convergence est un indice majeur, qualifié de binoculaire, qui permet au cerveau de percevoir le relief. D'autres indices, dits monoculaires, sont

également importants : les lignes de fuite, les occlusions (un objet partiellement occulté par un autre se situe derrière lui), les tailles relatives (plus un objet semble petit, plus il est éloigné), les textures (plus leurs détails sont visibles, plus ils sont proches)... À cette liste d'indices statiques s'ajoute un indice dynamique nommé parallaxe de mouvement et qu'on observe par exemple à travers la fenêtre d'un train : le mouvement apparent d'un objet éloigné de la fenêtre est plus lent que celui d'un objet proche. Grâce à ces indices monoculaires, on peut percevoir l'environnement en profondeur même lorsque l'un des deux yeux est déficient.

Des indices qui doivent être cohérents

L'appropriation des indices de profondeur monoculaires par les artistes a été progressive. Les peintres de la Renaissance ont été les premiers à maîtriser les lignes de fuite. Après l'invention de la photographie, on a ajouté un indice de profondeur artificiel : le flou artistique. En rendant flou l'arrière-plan ou l'avant-plan tout en laissant net le personnage principal, on guide l'attention du spectateur vers ce dernier et on accentue les différences de distance perçues entre les plans de l'image, ce qui augmente l'impression de profondeur. Tous ces indices ont été repris par le cinéma.

Pour restituer le relief sur un écran, il ne suffit donc pas de présenter une image différente à chacun des yeux : on doit aussi s'assurer que les indices de profondeur monoculaire et binoculaire concordent. C'est toujours le cas dans le monde réel, mais pas en stéréoscopie : si un objet jaillit de l'écran, par exemple, mais qu'il est masqué par le bord de cet écran (de sorte que l'indice monoculaire d'occlusion indique qu'il est derrière l'écran), cela crée un conflit psychovisuel gênant. Vérifier l'harmonie des différents indices est un travail important, qui doit être effectué avant la phase de tournage.

Entrons maintenant dans cette dernière phase. De même que les yeux reçoivent deux images différentes, on enregistre deux vues d'une même scène sous des angles légèrement distincts, à l'aide de deux caméras montées sur un même bâti (ou on crée ces deux vues dans le cas d'un film d'animation). Elles sont écartées horizontalement l'une de l'autre d'une distance dite interaxiale. Plus elle est grande, plus l'effet 3D sera important.

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Routhier, *Paving the road to 3D TV viability*, *ScreenPlays*, 2011.
www.screenplays-digital.com/screenplays/201109?pg=21#pg21

C. Vienne *et al.*, *Eye movements during vergence effort in stereoscopic ocular pursuit task and their relations to visual fatigue and stereopsis*, Vision Science Society annual meeting, 2011.

L. Blondé *et al.*, *3D stereo rendering challenges and techniques*, Conférence on information science and system, 2010.

L. Lipton, *Foundations of the Stereoscopic Cinema*, Van Nostrand Reinhold Inc., 1982.

Le plan de convergence est un plan qui passe par l'intersection des axes optiques des deux caméras. Les objets situés devant, dans et derrière ce plan seront respectivement visualisés devant le plan de l'écran, dans le plan ou derrière.

La longueur focale F (la distance entre l'objectif et l'image d'un point situé « à l'infini », c'est-à-dire en pratique éloigné d'au moins quelques dizaines de mètres des caméras) doit être aussi identique que possible pour les deux objectifs. Les rayons lumineux issus d'un même point ne frappent pas les capteurs des deux caméras au même endroit, et la différence de position dépend de la longueur focale et de l'angle de convergence α (l'angle entre les axes optiques des caméras). Cette différence, exprimée en pixels, est égale à la distance qui sépare les images gauche et droite d'un point sur l'écran lors de la projection. Si elle est trop importante, les yeux devraient diverger pour fixer les deux images, ce qui est impossible (pour la plupart d'entre nous !) : cet effet, dit de divergence, peut entraîner une fatigue visuelle, voire

la perception d'un dédoublement du fond de l'image dans les cas extrêmes.

Dès lors, on ajuste la longueur focale et l'angle de convergence en fonction de la taille maximale de l'écran visé. En effet, cette taille détermine la distance entre les pixels pour une image de résolution donnée (ayant par exemple 2048 pixels par ligne, un format classique), et donc le nombre de pixels d'écart autorisé entre les images droite et gauche d'un point. C'est une des différences clés avec un tournage 2D, puisqu'on doit connaître à l'avance la dimension maximale de l'écran pour lequel le contenu est prévu (écran de parc d'attraction, de cinéma, de téléviseur...) et s'adapter en conséquence.

La transformation d'un film prévu pour le cinéma en une version télévisuelle ne pose pas de problème de divergence puisque la distance entre les pixels, et donc entre les images gauche et droite d'un point, est plus petite sur un téléviseur ; l'inconvénient est que l'effet 3D sera moins saisissant. L'inverse n'est pas vrai : un contenu prévu pour la télévision, telle la retransmission 3D d'une rencontre sportive, nécessite

un traitement de postproduction important pour être projeté au cinéma.

Des problèmes de conversion se posent aussi avec les produits nomades, tels les caméscopes, les téléphones et les tablettes numériques : ces produits commencent à être équipés de doubles caméras, permettant à l'utilisateur de produire son propre contenu 3D. Or un contenu agréable à regarder sur une tablette risque d'entraîner des fatigues visuelles sur un écran de 50 pouces. On fournit donc des outils d'aide au tournage, afin d'apprendre au public à s'adapter au type d'écran visé.

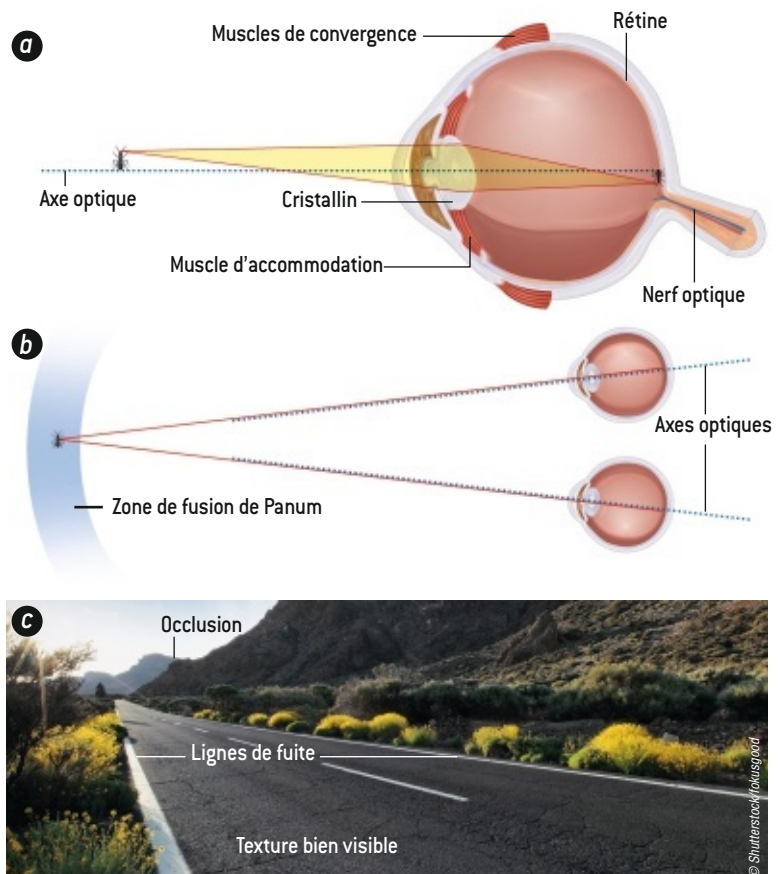
Lors du tournage et de la projection, on prête également attention aux proportions des objets. Pour un réglage de caméra donné, il existe une distance optimale à l'écran, pour laquelle les volumes sont respectés : à cette distance, l'angle moyen entre les deux yeux lorsque leurs axes optiques se croisent dans le plan de l'écran est égal à l'angle de convergence des caméras. Quand le spectateur s'éloigne de l'écran, il observe un allongement des objets et des visages ; on parle d'effet Pinocchio.

VOIR EN RELIEF : LES INDICES DE PROFONDEUR

Pour élaborer une représentation en relief, le cerveau analyse le degré de recouvrement des images légèrement différentes transmises par l'œil droit et l'œil gauche. Lorsqu'on fixe un objet, les yeux effectuent des réglages nommés accommodation et convergence. L'accommodation est une déformation du cristallin (en fonction de la distance de l'objet), permettant aux rayons lumineux issus de l'objet d'être focalisés sur la rétine (a). Sans cela, l'image est floue. Lors de la convergence, les deux globes oculaires se tournent vers l'objet, afin que leurs axes optiques se croisent dans le plan de l'objet (b).

Pour estimer l'éloignement de l'objet, le cerveau utilise les différences de localisation entre les images d'un même point sur les deux rétines, ainsi que les informations issues des muscles d'accommodation et de convergence. Autour de l'objet se trouve une zone dite de fusion de Panum : pour les éléments situés dans cette zone, le cerveau fusionne les images issues des deux yeux ; en dehors, le spectateur voit double. On parle de diplopie. Ainsi, quand on regarde au loin et qu'on rapproche un doigt de son visage, il se dédouble, car il sort de la zone de fusion de Panum.

Pour apprécier la profondeur d'une scène, le cerveau se fonde aussi sur les indices dits monoculaires (c), telles les lignes de fuite, les occlusions (un élément partiellement masqué par un autre, telle la montagne du fond, est situé derrière lui), les tailles relatives (les massifs de fleurs les plus éloignés apparaissent les plus petits) et les textures (plus elles sont visibles, plus l'objet est proche).



Bruno Bourgeois

Inversement, lorsqu'il se rapproche, les formes apparaissent comprimées. On conseille alors de se placer au milieu de la salle de cinéma pour limiter les déformations.

Pour réaliser un contenu 3D de qualité, on doit donc connaître la taille de l'écran visé et la distance de visualisation moyenne, puis régler l'angle de convergence en conséquence; ensuite, il n'est plus nécessaire d'y toucher. Le seul paramètre qui doit rester réglable pendant le tournage est la distance interaxiale entre les caméras, grâce à laquelle on varie les effets de profondeur.

Malheureusement, ces règles techniques ne sont pas toujours respectées. Certains réalisateurs préfèrent par exemple adapter l'angle de convergence pour que les axes optiques des caméras se croisent au niveau du personnage, même si celui-ci se déplace vers le cameraman. Le spectateur voit donc un personnage qui grandit en taille, mais qui ne se rapproche pas, puisqu'il reste dans le plan de l'écran. Cela crée une confusion, parfois gênante, lors de l'analyse de la scène par le cerveau.

Plus généralement, un certain nombre de paramètres peuvent causer une fatigue visuelle, des maux de tête ou des nausées. Tout phénomène que le cerveau ne rencontre pas dans la vie courante risque de provoquer des gênes, par exemple en suscitant des conflits sensoriels (voir l'encadré page ci-contre).

Des troubles évitables

La crainte de ces désagréments freine le déploiement de la 3D. Cette crainte est parfois injustifiée, comme dans le cas du conflit entre l'accommodation (la déformation du cristallin pour que l'image soit nette) et la convergence (la rotation des yeux pour que leurs axes optiques se croisent sur l'objet): dans la vie courante, l'accommodation et la convergence ciblent le même plan, mais en stéréoscopie, nos yeux font l'accommodation dans le plan de l'écran et convergent sur les objets, qui peuvent apparaître devant ou derrière l'écran. Les muscles des yeux n'étant pas habitués

à cette gymnastique, on craint souvent que cela provoque une fatigue oculaire. En réalité, cette fatigue est négligeable pour un spectateur situé à plus d'un mètre de l'écran, cas du cinéma et de la télévision. En revanche, ce conflit peut être gênant sur des écrans portables, pour lesquels la distance de visualisation est de l'ordre de 10 à 40 centimètres; il faut alors limiter la profondeur des effets.

Même lorsque le risque de gêne est réel, les causes en sont assez facilement évitables ou corrigibles. Par exemple, si la scène à filmer comporte des objets brillants qui réfléchissent plus ou moins l'environnement (telle la mer, lors d'un coucher de soleil), des éclairs lumineux apparaissent parfois sur une vue, mais pas sur l'autre, ce qui peut être perturbant. On peut y remédier en partie en postproduction, mais il est préférable de surveiller ce paramètre en amont, au moment du tournage. En outre, on doit veiller au respect de la cohérence entre les indices de profondeur monoculaires et binoculaires.

LE TOURNAGE : DEUX CAMÉRAS POUR SIMULER LES DEUX YEUX

Pour enregistrer les vues qui seront projetées sur les deux yeux, on utilise deux caméras, séparées d'une distance dite interaxiale (a): plus elle est grande, et plus les effets de relief perçus seront importants. L'angle α entre les axes optiques des caméras est nommé angle de convergence. Il doit être égal à l'angle moyen entre les deux yeux lorsque leurs axes optiques se croisent dans le plan de l'écran (on doit donc connaître à l'avance la distance moyenne de visualisation prévue). Lors de la projection, les

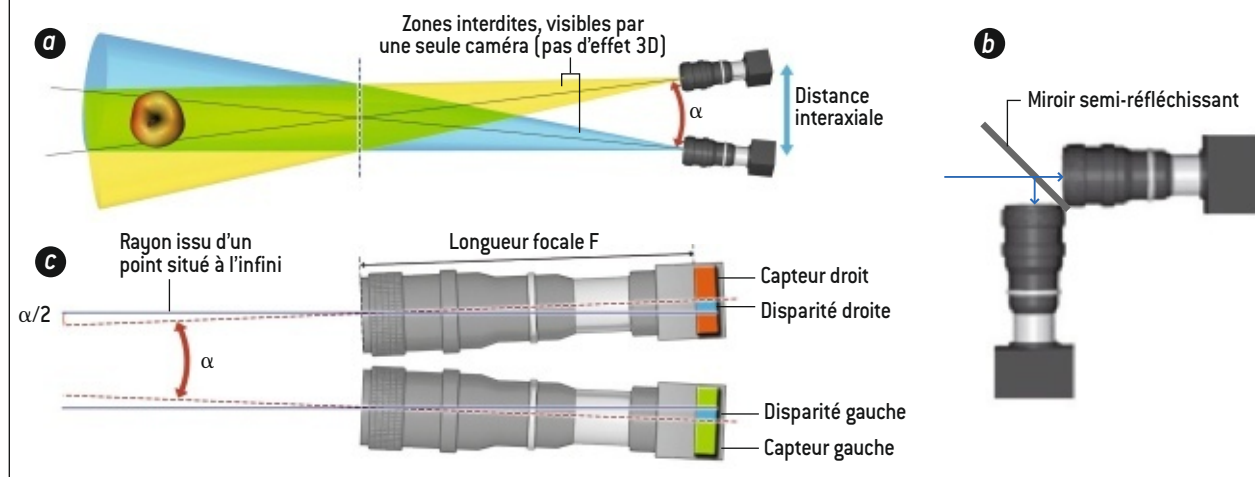
objets apparaîtront devant, sur ou derrière l'écran selon qu'ils sont respectivement situés devant, sur ou derrière l'intersection des axes optiques des caméras (ici, la pomme apparaîtra derrière l'écran).

La distance interaxiale va de quelques millimètres pour un gros plan à plusieurs dizaines de centimètres pour des scènes lointaines. Lorsqu'elle est faible, l'encombrement des caméras empêche leur juxtaposition. On se sert alors d'un système avec un miroir de séparation semi-réfléchissant (b): l'une des

caméras enregistre l'image qui traverse le miroir, tandis que l'autre filme celle qui est réfléchi; les deux vues distinctes sont obtenues en tournant ou en décalant les caméras. Si le miroir est déformé, un « flou différentiel » apparaît (les plans de focalisation différent et les deux images ne sont pas nettes aux mêmes endroits). Aussi produit par des différences d'ouverture et de longueur focale entre les caméras, ce phénomène peut susciter des gênes.

On parle de disparité quand un même point ne forme pas une

image au même endroit sur les capteurs des deux caméras (c). La disparité droite (ou gauche) est la distance en pixels de l'image du point au centre optique sur le capteur droit (ou gauche). La disparité totale est la différence des deux; elle est égale au nombre de pixels qui sépareront les images gauche et droite d'un même point sur l'écran lors de la projection. Pour un point situé à l'infini, la disparité ne dépend que de la longueur focale F de la caméra et de l'angle de convergence α .



Bruno Bourgeois

Les gênes résultent souvent de différences entre les images gauche et droite. Les systèmes optiques des deux caméras ne peuvent être rigoureusement identiques, d'où des déformations géométriques différentes d'une vue à l'autre; le phénomène est accentué par le zoom. Des hétérogénéités de couleur et de luminosité apparaissent également entre les deux images. En outre, les deux caméras doivent être parfaitement synchronisées, car un décalage supérieur à cinq millièmes de seconde entre les prises des vues droite et gauche peut susciter des nausées pour des objets en mouvement. Enfin, les deux images sont parfois floues à des endroits différents (*voir l'encadré page ci-contre*). Tous ces défauts peuvent et doivent être corrigés en postproduction.

Des individus plus ou moins sensibles

Nous avons vu que chaque individu est plus ou moins sensible aux effets stéréoscopiques. Certains sont gênés, d'autres pas. Des études ont montré que c'est le cas même quand toutes les règles de production et de projection sont respectées; les gênes dont sont victimes certains spectateurs sont alors considérées comme des symptômes de dysfonctionnement de leur système visuel, la 3D agissant comme un révélateur.

Une fois les images droite et gauche enregistrées, comment les oriente-t-on vers les yeux correspondants? Trois techniques principales existent au cinéma (*voir l'encadré page suivante*). Par ordre décroissant d'utilisation, on trouve: la projection d'images polarisées combinée à des lunettes passives (systèmes *RealD* et *Technicolor*); la projection d'images non polarisées combinée à des lunettes actives (systèmes *XpanD*, *Nuvision*, *Volfony*...); la projection d'images de spectres de couleur différents combinée à des lunettes passives (système *Dolby*).

Examinons ces techniques, qui utilisent presque toutes un projecteur numérique. Un tel projecteur se compose de lampes au xénon éclairant un ensemble de trois imageurs ou micro-écrans: chacun affiche les composantes de l'image associées à une couleur fondamentale (rouge, vert, bleu). Un système optique combine les images primaires ainsi formées et les projette *via* un objectif sur un écran de cinéma.

Le système *RealD*, fondé sur des images polarisées et des lunettes passives, équipe près de 80 pour cent des écrans de cinéma 3D de la planète. Les images gau-

Impact de la 3D sur l'art cinématographique

Filmer en 3D implique de respecter de nouvelles règles de prise de vue, ce qui demande au réalisateur un travail artistique différent par rapport à la 2D. Par exemple, les films d'action 2D abondent de scènes courtes et saccadées, ainsi que d'effets créés par des mouvements rapides de caméra. Ils sont à éviter en 3D. En effet, une succession de scènes courtes fait converger rapidement le regard du spectateur sur des objets situés à des profondeurs différentes, ce qui implique trop d'efforts visuels. Des mouvements de caméras rapides entraînent des conflits sensoriels entre les informations transmises au cerveau par les systèmes visuel et vestibulaire – celui de l'équilibre, incluant l'oreille interne. Cela suscite des

nausées similaires à celles d'un mal de mer.

Les zooms dynamiques sont également à prohiber. L'œil n'étant pas doté de cette fonction, il n'est pas équipé pour traiter les images issues d'un zoom, et divers désagréments en résultent: aplatissement des objets, fatigue... Il est préférable de remplacer les zooms par des translations lentes des caméras (*travelings*). Les fondus enchaînés et autres effets de transitions entre plans, difficiles à maîtriser, sont aussi à limiter. Les flous artistiques, inventés pour donner du relief à l'image, sont superflus, puisque l'information réelle de profondeur est disponible; en outre, le spectateur balaie davantage l'image du regard en 3D, et si certaines parties sont

floues, cela peut créer un sentiment désagréable.

Outre ces règles techniques, des paramètres plus subjectifs sont à prendre en compte. Il faut trouver le bon équilibre entre un niveau de relief suffisant pour satisfaire le spectateur (qui peut se sentir floué si les effets 3D sont trop « plats ») et des jaillissements trop forts ou trop fréquents, qui fatiguent la vision. Les émotions doivent être véhiculées d'une façon nouvelle, en ajoutant harmonieusement la profondeur au mouvement, à la couleur, aux dialogues et à la musique. Dès les phases préliminaires, le réalisateur et le stéréographe écrivent le scénario de profondeur en détail, un peu comme un musicien écrit la musique d'un film en fonction des émotions à susciter...

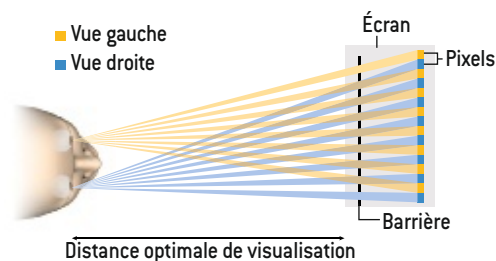
che et droite sont affichées alternativement, 48 ou 72 fois par seconde chacune selon les projecteurs. Devant l'objectif est placé un commutateur de polarisation, qui change la polarisation de la lumière en synchronisme parfait avec les images. Il comprend trois constituants: un filtre sélectionne d'abord les composantes de la lumière polarisées linéairement à 45 degrés; puis un commutateur préserve ou inverse cette polarisation; enfin, une lame quart d'onde transforme la polarisation linéaire en polarisation circulaire (gauche ou droite, selon que le champ d'entrée est polarisé à plus ou moins 45 degrés) en entraînant des retards de phase différents sur les composantes horizontale et verticale du champ.

À la sortie du commutateur de polarisation, les images gauche et droite sont respectivement dotées d'une polarisation circulaire gauche et droite. Elles sont ensuite projetées sur un écran argentique (recouvert d'une pellicule de sels d'argent), qui préserve la polarisation. Les « verres » gauche et droit des lunettes du spectateur (ils peuvent être en plastique) sont pourvus des filtres polarisants correspondants.

L'avantage principal de cette technique est le faible coût des lunettes, qu'on peut laisser au spectateur en fin de séance; il pourra les réutiliser au cinéma ou chez lui s'il dispose d'un téléviseur 3D approprié.

La 3D sans lunettes

✓ Des écrans 3D sans lunettes sont déjà utilisés pour de petits appareils, tels les téléphones portables. Un pixel sur deux affiche l'image droite (et l'autre la gauche), et une barrière, située un peu en avant du pixel, masque une des deux images à l'œil auquel elle n'est pas destinée. Les premiers téléviseurs 3D sans lunettes ont été commercialisés fin 2011 au Japon: ils sont fondés sur l'envoi directionnel de vues différentes, mais l'aiguillage y est réalisé par des réseaux de microlentilles.

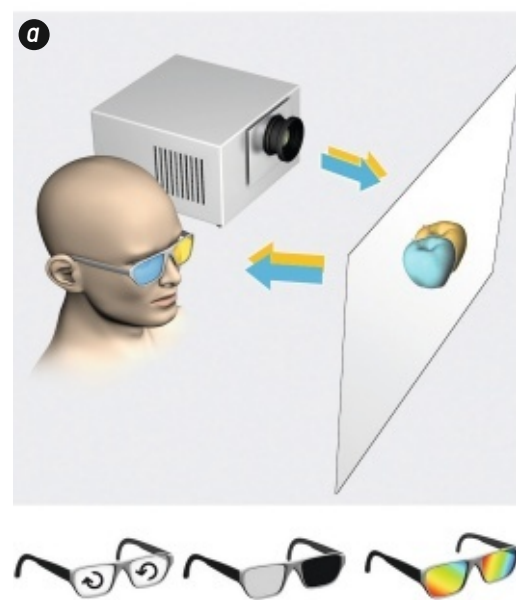


Lors de la projection, les vues droite et gauche doivent être orientées sur les yeux correspondants. Elles sont projetées alternativement au même endroit sur l'écran, et l'aiguillage se fait grâce à des lunettes (a). Aujourd'hui, trois types de lunettes existent (a, en bas) : de gauche à droite, les lunettes sont respectivement dotées de filtres polarisés (les vues droites et gauches doivent alors avoir la polarisation correspondante), d'obturateurs (lorsqu'une vue est projetée, le verre de l'œil auquel elle n'est pas destinée est obturé sur commande) et de filtres colorés (les images droite et gauche sont alors codées avec des longueurs d'onde différentes).

Un point donné apparaît au croisement des rayons lumineux qui vont de ses images droite et gauche aux yeux correspondants (b). Selon qu'ils se croisent devant, sur ou derrière le plan de l'écran (cas 1,2,3), le point apparaît aux positions correspondantes par rapport à ce plan. Plus les images droite et gauche du point sont

éloignées, plus l'effet de profondeur est important. Lorsque les rayons sont parallèles, le point apparaît situé à l'infini (cas 4). Les yeux droit et gauche se tournant respectivement vers les images droite et gauche du point, celles-ci ne doivent pas être trop écartées, sinon les yeux devraient diverger (cas 5). L'écart maximal correspond à la distance interoculaire moyenne d'un adulte, de l'ordre de 65 millimètres.

Il existe une distance de visualisation optimale, pour laquelle les objets sont perçus aux bonnes proportions. En deçà, ils semblent comprimés et au-delà, ils paraissent allongés : ainsi, plus on s'éloigne, plus la distance AB paraît longue (c). On parle d'effet Pinocchio. Le paramètre clé est le rapport entre la distance à l'écran et la largeur de celui-ci (égal au rapport entre la longueur focale de la caméra et la largeur du capteur). Au cinéma, où l'écran est large, ce rapport change peu, de sorte que l'effet Pinocchio est faible pour un déplacement de quelques rangées dans la salle.



L'inconvénient principal est l'obligation pour le propriétaire de la salle de remplacer son écran blanc standard par un écran argentique. Outre son coût élevé, ce type d'écran n'affiche pas la même luminosité selon le point de l'écran (les rebords sont plus sombres que le centre) et l'endroit de la salle d'où il est vu.

Les images peuvent aussi être polarisées par une technique alternative, développée par l'entreprise *Technicolor*. Cette technique, fondée sur un projecteur classique, épargne l'achat d'un projecteur numérique. Sur la pellicule, les images gauche et droite sont juxtaposées verticalement sur l'espace usuellement réservé à une seule image ; elles sont comprimées pour tenir dans l'espace disponible. On remplace alors l'objectif de projection classique par un double objectif, incorporant des éléments qui dotent les images gauche et droite de polarisations circulaires différentes ; elles sont ensuite projetées au même endroit sur l'écran.

Le deuxième procédé très utilisé, notamment en France, exploite des lunettes actives : chaque verre de lunettes est constitué d'un écran à cristaux liquides, qui peut être rendu opaque ou transparent sur commande. Les images droite et gauche sont envoyées alternativement sur l'écran, mais elles ne sont pas polarisées. Pour que chaque œil voit la bonne image, un émetteur infrarouge ou radio envoie des impulsions invisibles aux lunettes, afin de com-

mander l'obturation d'un des verres. Grâce à la rapidité des commutations, l'utilisateur ne perçoit pas de papillotement.

À l'inverse du précédent, ce procédé fonctionne avec un écran blanc standard. Celui-ci peut donc servir aussi bien pour des films 2D que pour des films 3D, sans que la luminosité perçue dans la salle ne soit hétérogène. En revanche, les lunettes actives présentent plusieurs inconvénients : coût élevé, nécessité de les récupérer en fin de séance et de s'assurer que les piles ou les batteries sont chargées... En outre, elles sont plus lourdes et moins confortables que les lunettes passives. C'est pourquoi certains cinémas, qui avaient d'abord opté pour les lunettes actives, y ont renoncé.

On a alors mis au point un système combinant les avantages des précédents, et évitant leurs inconvénients. Ce système, dit multispectral, est fondé sur le principe de métamérisme, selon lequel on peut créer une même couleur apparente pour l'œil humain à partir de différents spectres lumineux, autrement dit par des mélanges de couleurs différents. Ainsi, les images gauche et droite sont décomposées en composantes primaires distinctes : les images gauches, par exemple, sont toujours obtenues avec le même jeu de longueurs d'onde, dont on module les amplitudes pour créer les images gauches successives. Les lunettes sont passives, composées de deux filtres colorés différents. Le verre d'un œil ne laisse alors passer que les

longueurs d'onde avec lesquelles l'image destinée à cet œil est codée.

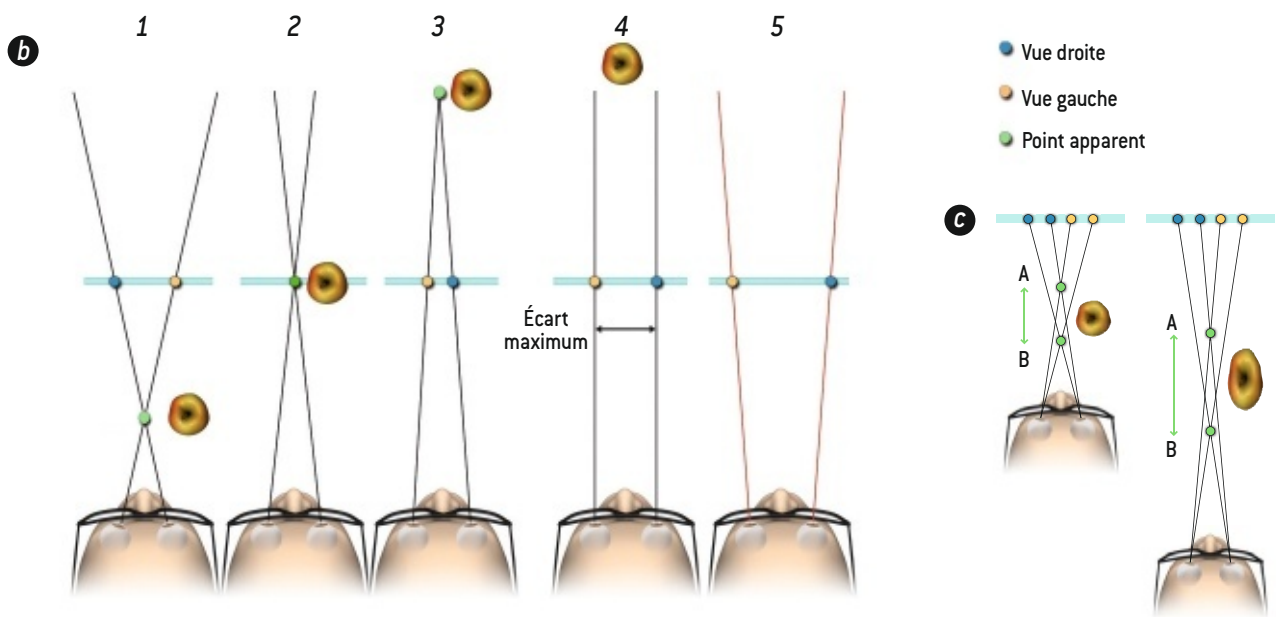
Ce système est le moins répandu, sans doute parce qu'il nécessite un changement coûteux de projecteur numérique. C'est pourtant le seul qui utilise à la fois un écran blanc et des lunettes passives. Les lunettes sont confortables et meilleur marché que des lunettes actives, mais, du fait de leurs filtres colorés très sélectifs et élaborés, elles sont plus chères que celles des systèmes *RealD* et *Technicolor*.

Tous ces systèmes réduisent notablement la luminosité des images par rapport à un projecteur 2D. En moyenne, les images semblent environ cinq fois moins lumineuses que des images bidimensionnelles. En outre, il arrive qu'une fraction de l'image dédiée à l'œil droit se retrouve sur l'œil gauche et réciproquement, pour diverses raisons : polariseurs imparfaits pour les lunettes passives, temps de commutation trop lent pour les lunettes actives... Un double fantomatique se superpose alors à l'image perçue ; on parle de *ghosting*.

L'arrivée de la télé 3D

Outre les cinémas, la 3D conquiert peu à peu les foyers. En 2011, 24 millions de téléviseurs 3D ont été vendus dans le monde, soit 11 pour cent du total. Cependant, plusieurs défis restent à relever.

Aujourd'hui, la plupart des téléviseurs 3D fonctionnent avec des lunettes actives,



dont le prix est élevé. Au coût élevé et à la difficulté de gestion des batteries s'ajoute un effet désagréable de papillotement lorsqu'on regarde un programme sous éclairage artificiel, car les images gauche et droite sont projetées à une fréquence voisine de celle de l'éclairage (50 ou 60 hertz).

Les téléviseurs à lunettes actives disparaîtront probablement d'ici 2015. Ceux à lunettes passives polarisées commencent à s'imposer, notamment aux États-Unis. Ces lunettes sont bon marché et identiques à celles de type *RealD* au cinéma ; elles fonctionnent bien quel que soit le niveau d'éclairage. Cependant, elles ont deux inconvénients principaux. Premièrement, la résolution verticale est divisée par deux (les lignes de pixels impaires et paires du téléviseur affichent respectivement les images polarisées gauche et droite). Deuxièmement, le spectateur doit être parfaitement face à l'écran, sous peine de voir des images dédoublées.

Un nouvel écran, fonctionnant avec des lunettes passives polarisées, est en cours de développement. Les images seront affichées alternativement à haute fréquence (de 240 à 480 hertz), et un dispositif commutera leur polarisation. La résolution de l'image ne sera pas divisée. Aucun effet de papillotement ou de « ghosting » n'apparaîtra. Cet écran devrait être commercialisé en 2012 ou 2013, mais il est difficile à produire en série. La sortie commerciale a déjà été repoussée à plusieurs reprises.

Autre frein : trop peu de contenu est disponible. On ne trouve qu'une centaine de films en *Blu-ray* 3D, le format 3D le plus répandu. Quelques chaînes et opérateurs de télévision par satellite ou ADSL diffusent des films et des retransmissions sportives en 3D, mais cela reste limité.

À quand la 3D sans lunettes ?

Même si les lunettes futures des téléviseurs 3D seront moins chères, il reste à prouver que le public est prêt à les acheter et à les porter régulièrement. La 3D prendra un nouvel élan le jour où une technologie sans lunettes performante sera accessible au grand public pour toute taille d'écran (de 3 à 60 pouces). De tels systèmes existent déjà sur les petits écrans des téléphones portables, des tablettes et des caméscopes 3D. Ces derniers utilisent principalement des techniques dites à barrières de parallaxe : un pixel sur deux contient l'information destinée à l'œil droit (ou gauche), et les rayons lumineux issus de ce pixel sont masqués à l'œil auquel ils ne sont pas destinés, grâce à des panneaux placés un peu en avant du pixel (voir la figure page 61, en bas).

Des téléviseurs de 12 et 20 pouces ne nécessitant pas de lunettes ont été lancés au Japon en décembre 2011 : ils diffusent neuf vues différentes de façon directionnelle, grâce à des réseaux de microlentilles placés devant les pixels ; en théorie,

neuf caméras sont donc nécessaires, mais des techniques de traitement numérique devraient permettre de créer des vues intermédiaires à partir de deux vues originales stéréoscopiques. Lorsque le spectateur se trouve au bon endroit, chaque œil reçoit deux vues différentes sans l'aide de lunettes. En outre, on peut tourner autour des objets comme dans la vie réelle, même si l'angle de visualisation reste un angle limité (10 à 15 degrés). En dehors de cette zone autorisée, les yeux reçoivent des informations incohérentes et l'effet 3D n'est plus perceptible.

Pour assurer le déploiement de cette approche, on devra augmenter la taille de la zone de visualisation, en multipliant le nombre de vues. Il faudra, d'une part, fabriquer des écrans plats avec une résolution très supérieure à ce qui existe aujourd'hui (de l'ordre de 4 à 16 fois la résolution HD), et, d'autre part, atteindre des prix compatibles avec le marché de masse des téléviseurs. Selon les estimations, on y parviendra en cinq à dix ans.

Au cinéma, la 3D sans lunettes nécessitera d'augmenter le nombre de projecteurs et de remplacer l'écran classique par un écran aiguillant les différentes vues dans des directions distinctes. Cela représente des investissements coûteux, voire rédhibitoires. Même si des prototypes de petite taille ont été réalisés en laboratoire, la 3D sans lunettes sera bien plus longue à mettre en place au cinéma... ■

Le DÉPISTAGE du cancer de la prostate

Marc Garnick

Faut-il dépister systématiquement le cancer de la prostate chez l'homme âgé de plus de 50 ans ? Aujourd'hui, beaucoup de médecins pensent que non, parce que les risques semblent l'emporter sur les bénéfices pour certains malades.

À l'automne 2011, un comité consultatif américain composé de médecins et d'épidémiologistes a fait sensation en déclarant que les hommes en bonne santé ne doivent plus faire de façon systématique le test sanguin de dépistage du cancer de la prostate. Le comité a déclaré que l'analyse des données disponibles n'avait mis en évidence qu'un bénéfice faible, si ce n'est nul à long terme, du dosage de l'antigène spécifique de la prostate, PSA, chez la majorité des hommes ne présentant aucun symptôme de la maladie. Non seulement le dépistage systématique n'épargne pas de vies, mais il expose inutilement de nombreux

hommes, pour lesquels le test de dépistage était positif, aux complications liées à l'intervention chirurgicale ou au traitement : l'impuissance et l'incontinence urinaire dues à l'ablation chirurgicale de la prostate, ou des saignements rectaux après une radiothérapie. Le comité américain a estimé qu'aux États-Unis plus d'un million d'hommes avaient été traités depuis 1985 après un test de dépistage positif. Au moins 5000 d'entre eux sont décédés peu de temps après le traitement et 300000 ont souffert d'impuissance ou d'incontinence ou des deux à la fois. L'annonce du comité consultatif, dont la volonté est d'éviter ces effets secondaires au maximum

de patients, suscita rapidement un contre-feu de la part de plusieurs organisations de professionnels, notamment de l'Association américaine d'urologie.

La controverse n'est pas récente. Des experts débattent depuis longtemps de l'intérêt du dosage du PSA, mais jusqu'ici, aux États-Unis, la majorité se déclarait en faveur du maintien du test. En tant qu'oncologue spécialiste du cancer de la prostate, j'adhère à la prise de position récente du comité consultatif. S'il faut insister sur le fait que le dosage de l'antigène PSA fournit de précieuses informations chez un homme qui a un cancer de la prostate, il faut aussi reconnaître que les preuves en faveur du dosage systématique du PSA sont fragiles. Soulignons qu'en France également, la Haute autorité de santé a récemment émis un avis identique à celui du comité américain.

Le débat ne porte pas uniquement sur le dosage du PSA. Se pose la question de savoir s'il faut traiter un patient dont le