

3

IMAGES : IMAGERIE, REPRÉSENTATION, MODÈLES

A. Claude BOCCARA
Line GARNERO

L'IMAGE, UN THÈME TRANSVERSE PAR EXCELLENCE

Jacques Bittoun
Isabelle Bloch
Pierre Chavel
Maïté Coppé
Daniel Courjon
Fabrice Heitz
Claude Fabre
Mathias Fink
Denis Joyeux
Philippe Lanièce
Pierre Léna
Dominique Lesselier
Brahim Lounis
Philippe Réfrégier

L'image du biologiste est liée à celle de son microscope, dans le monde scientifique l'image a été aussi un support incontournable pour l'astronomie, la physique des particules, le contrôle non destructif ou plus récemment pour l'imagerie médicale. Pour des raisons différentes ces domaines ont largement stimulé l'acquisition, le traitement et la représentation des images. On imagine parfois mal la somme des compétences techniques et scientifiques mises en jeu pour réaliser des instruments qui font partie du quasi quotidien : on ne s'étonne plus des images des galaxies que les médias nous offrent venant du VLT* ou des échographies 3-D qui révèlent une fissure dans un moteur d'avion et nous montrent le visage d'un enfant avant sa naissance.

Les deux dernières décades ont vu croître le nombre d'images représentant des phénomènes physiques diverses à toutes les échelles jusqu'aux nano objets. Dans ce domaine les méthodes mises en jeu ont largement contribué aux développements spectaculaires des nanosciences et des nanotechnologies (il fallait en effet contrôler, tester, mesurer, etc.)

QUE REPRÉSENTE UNE IMAGE ?

Nous nous proposons ici de faire un bref tour d'horizon d'un sujet trop vaste pour en dresser les contours de façon exhaustive : l'image est en effet aujourd'hui omniprésente que cela soit comme passerelle pour l'interface homme-machine, homme-instrument, etc. ou comme support privilégié des domaines artistiques, culturels ou du monde des loisirs. Par leur pouvoir d'évocation et leur beauté, les images sont également un vecteur privilégié d'inspiration et de communication tant avec le grand public que vers le système éducatif.

Il nous faut sans doute distinguer au moins trois niveaux dans la description de la perception que nous pouvons avoir des images :

Le premier niveau est celui de l'image qui retranscrit telle quelle l'information sans en dénaturer la signification physique ; l'image peut alors être prise comme une mesure qui permet de faire un aller-retour entre le monde physique et le traitement de l'information. À ce niveau l'acquisition ne modifie en rien la valeur physique de la mesure. Les images acquises en photographie ou en microscopie classique entrent dans cette catégorie.

Au second niveau, l'image apparaît comme un codage ou une transcription de l'information physique ; nous pouvons illustrer ce point avec la microscopie à contraste de phase (1954) : les couleurs (teintes de Newton) n'ont rien à voir avec la couleur des objets transparents observés. Une autre évolution a eu lieu avec l'invention des microscopes à sonde locale : il fallait se donner une représentation spatiale d'un phénomène physique (par exemple le courant tunnel) pour lequel échantillon et sonde jouent des rôles symétriques : on est loin d'une observation passive, non perturbante. Ces deux découvertes ont chacune été récompensées par un prix Nobel tant les champs ouverts s'avéraient importants.

Enfin à un troisième niveau il faut prendre en compte la perception visuelle, la représentation faite par le système visuel et l'interprétation finale de l'image ; l'image

apparaît ainsi liée au Système Visuel Humain et la représentation que ce système peut en faire peut nous illusionner.

Notons que la mutation n'est pas l'imagerie numérique, qui n'est qu'une commodité, mais elle reste bien l'apparition de microscopes ou d'autres systèmes d'imagerie à images en fausses couleurs, nécessitant donc un apprentissage quant à leur interprétation.

Cependant l'utilisation des images numériques a permis le développement du domaine de traitements d'image qui permet d'extraire ou de reconstruire des informations qui ne sont pas forcément visibles directement.

Nous ne parlerons pas dans ce tour d'horizon du domaine des images de synthèse qui occupent une place de plus en plus importante dans l'art et les media et pour lequel les développements mathématiques récents (par exemple l'utilisation des fractales) et les méthodes numériques jouent un rôle déterminant.

Tous les Départements Scientifiques du CNRS sont concernés par l'Image à différents niveaux ; les exemples qui illustrent ce rapport couvrent des domaines où sont impliqués les chercheurs des départements SPM, STIC, SPI, SDV, SDU ainsi que PNC.

Les images jouent, en effet, un rôle absolument essentiel en astronomie, en physique et en géophysique, en contrôle non destructif, en biologie, en médecine etc. car elles révèlent la complexité des objets et des structures que d'autres types d'approches sont insuffisantes à traduire. Leur interprétation est donc fortement dépendante des modèles physiques utilisés.

1 - LA MESURE ET LES EFFETS PHYSIQUES

Les techniques d'imagerie reposent sur des propriétés physiques de plus en plus variées. On connaît en effet de nombreux

systèmes qui ont très largement débordé du domaine initial de l'optique et de la vision pour couvrir l'intégralité du spectre électromagnétique, faire appel à l'acoustique, au magnétisme, à la physique des particules et à de nombreuses autres propriétés comme les forces ou le courant tunnel.

Le domaine de l'imagerie a connu une large diffusion dans différents secteurs d'applications avec des capteurs de nature variée (imagerie optique – visible, infra-rouge, radar, multispectrale, superspectrale, hyperspectrale, IRM*, IRMf*, TEMP*, PET*, etc.), avec les progrès importants qui ont été réalisés sur des modalités d'imagerie récentes (MEG* / EEG*, etc.) et enfin avec le développement dans nos laboratoires de nouvelles modalités (imagerie polarimétrique, microscopie photothermique, tomographie optique, tomographie d'impédance électrique, ...). La télédétection, le contrôle non destructif, l'astronomie et la médecine figurent sans doute parmi les secteurs les plus demandeurs sur ce dernier point.

1.1 ORIGINE PHYSIQUE DU CONTRASTE

La télédétection et l'imagerie microondes

La découverte des images de la terre à partir des satellites fait partie du quotidien avec les bulletins météorologiques. Pour ce domaine la masse d'informations que portent les images est considérable et les modèles physiques qui permettent de traiter ces données sont de plus en plus puissants.

L'analyse des déphasages entre deux images radar par la technique interférométrique permet de mesurer, avec une précision millimétrique, les mouvements du terrain avec deux acquisitions et également d'obtenir le relief par effet stéréoscopique grâce à la très grande sensibilité de ces mesures.

Pour extraire des informations décrivant le relief on utilise aussi une technique photogrammétrique appliquée aux images radar : on compare ainsi deux images qui observent un même territoire de deux points de vue différents, et on identifie la position relative des objets dans les deux images pour déduire l'altitude de la différence de position. L'imagerie radar permet ici de réaliser des observations précises sur des zones très nuageuses où l'optique s'avère inefficace.

Ces méthodes d'imagerie trouvent des applications de plus en plus nombreuses pour l'agriculture, l'environnement, la forêt, l'hydrologie, la géologie, les transports, et l'urbanisme.

L'imagerie utilisant les rayonnements microondes peut aussi procéder par transmission, diffraction ou réflexion de ces ondes à travers un objet ou un tissu, et estimer à partir des champs détectés les propriétés d'impédance de ces objets. Ses principaux domaines d'applications sont le domaine géophysique et celui du contrôle non destructif.

L'imagerie spectrale

La couleur est perceptible à l'observateur humain ; elle est liée au spectre, et la spectro-imagerie est un domaine de développement instrumental qui n'a pas encore livré tout son potentiel. En fait, attacher à chaque pixel un spectre complet de haute résolution pose parfois des problèmes de masse de données redoutables : en télédétection, l'imagerie de pollution présentant une bonne sélectivité au gaz polluant, exige une haute résolution, alors que l'imagerie de l'état de la végétation n'implique que des bandes très larges. Tout acquérir et tout stocker est apparemment vain, il faut donc rechercher des méthodes de spectro-imagerie souples tant en bande spectrale qu'en résolution.

En astronomie, où encore une fois l'identification d'éléments atomiques ou moléculaire exige une haute résolution dans des bandes très étroites réparties sur un large spectre, il est

habituel de mesurer une information spectrale riche sur un nombre d'échantillons spatiaux de plus en plus grand. La variété des configurations imaginées par les astronomes pour obtenir des données tridimensionnelles (deux angles et la longueur d'onde) est étonnante.

De même en télé-détection avec les satellites de type agile (le satellite est mobile autour 3 axes) une résolution spatiale de un mètre et les capteurs hyperspectraux permettront d'augmenter significativement la résolution spectrale et d'enregistrer plusieurs centaines de bandes.

La combinaison, dans un même instrument, d'un mode imagerie (deux dimensions) et d'un mode spectroscopique (une dimension) conduit à l'acquisition de « cubes de données », permettant de saisir simultanément les propriétés spectrales et spatiales d'un objet : distribution de vitesses, abondance d'éléments chimiques, conditions d'excitation de ces éléments, dynamique, etc.

Cette combinaison spectro-spatiale, éventuellement complétée de l'évolution temporelle pour certains objets (de la biologie à l'astrophysique), ainsi que de la polarisation de la lumière conduit à manipuler des volumes considérables de données, souvent pertinentes, pouvant dépasser le téraoctet.

L'optique où on ne l'attendait plus : la tomographie des tissus biologiques

Les tissus biologiques, dans les zones spectrales où ils ne sont pas trop absorbants (rouge et proche IR) diffusent fortement la lumière aussi les observations directes « en profondeur » ne sont-elles pas praticables. Pourtant le contraste optique tel qu'il apparaît par exemple aux yeux de l'anatomopathologiste sur les pièces opératoires est porteur d'une information souvent pertinente. Comment réaliser des « biopsies optiques » virtuelles sans pénétrer matériellement dans les tissus ?

Pour ce qui est de l'observation à faible profondeur (< 1 mm), les *photons balistiques*,

même très fortement atténués (~ un milliard de fois) sont encore détectables à condition de les isoler du fond de lumière diffusée beaucoup plus intense (~ quelques millions de fois).

La *microscopie confocale*, par filtrage spatial, permet de réaliser des « sections » à une centaine de μm de profondeur.

La *microscopie non linéaire* (fluorescence après une absorption bi ou tri photonique ou génération d'harmoniques) utilise une source dans le proche IR, moins diffusée que la lumière bleue ou UV et qui n'est active qu'au voisinage de la zone focale. En effet seule la forte densité de puissance obtenue aux foyers des objectifs de microscopes avec des lasers dont les impulsions durent quelques dizaines à quelques centaines de femtosecondes permet d'observer ces signaux. Il faut souligner ici l'impact considérable que cette approche a eu en biologie en quelques années.

La *tomographie de cohérence* (OCT ou OCM) présente sans doute la plus grande dynamique (~ 120 dB), elle utilise les interférences entre la lumière rétro diffusée par une « tranche » d'échantillon dont l'épaisseur est voisine de la longueur de cohérence de la source (~1 à 10 μm) et un faisceau de référence pour réaliser des coupes dans la profondeur des tissus.

L'OCT a connu des développements spectaculaires en ophtalmologie elle est aussi précieuse pour le suivi du développement embryonnaire.

À plus grande profondeur les photons balistiques sont complètement atténués et il faut travailler avec les *photons diffusés*.

Le plus souvent l'utilisation de *portes temporelles* rapides (électroniques ou basées sur l'optique non linéaire) permet, en sélectionnant les photons qui sont restés près de la trajectoire balistique, d'échapper partiellement aux effets négatifs de la diffusion en terme de contraste et de résolution : ces photons, dits *serpentiles* existent d'autant plus que les cellules qui constituent les tissus biologiques diffusent très fortement vers l'avant.

Malgré des avancées certaines au niveau des approches expérimentales et de la résolution du problème inverse des progrès restent à faire pour atteindre les performances que souhaitent les radiologistes (~1mm au lieu de 1cm aujourd'hui pour des tumeurs situées à quelques cm de profondeur).

Une situation plus simple, pour la résolution du problème inverse, consiste à mettre en évidence une variation temporelle de la distribution spatiale des propriétés optiques sans chercher à reconstituer les propriétés optiques de toute la structure. Cette situation se produit s'il y a injection d'un produit de contraste ou activation (cérébrale par exemple) par un stimulus extérieur. Ce domaine qui a vu le jour sur la côte est des USA depuis une décennie commence à être exploré en France.

On peut enfin tirer partie de l'acoustique pour révéler *des contrastes optiques* avec une résolution qui est celle de l'échographie acoustique (~ 1 mm).

Deux effets physiques peuvent être utilisés :

– *l'effet acousto-optique* consiste à « marquer » localement les photons par les ultrasons. À condition d'utiliser un laser de longueur de cohérence suffisante pour que les photons émergents créent un speckle observable, les ultrasons vont changer périodiquement la position des diffuseurs et moduler l'intensité de chaque grain de speckle. On peut ainsi créer une « source virtuelle » de photons marqués de taille millimétrique (dans la zone où ultrasons et photons sont simultanément présents) capable de révéler les propriétés optiques locales des tissus : par exemple cette « source » verra sa luminance diminuer si elle est placée dans une zone absorbante (tumeur vascularisée) ;

– *l'effet opto-acoustique* est lié à l'absorption d'une impulsion laser brève par une zone de l'échantillon. Cette absorption est suivie d'une rapide thermalisation et d'une variation locale de la masse volumique à volume constant qui est source d'ondes ultrasonores. L'intensité du signal acoustique est liée à la distribution des coefficients d'absorption locaux (induit

par exemple par une activation cérébrale). Le problème inverse consiste à reconstituer la distribution de ces sources acoustiques, là encore la résolution est celle de l'acoustique et le contraste est lié à l'absorption.

Les domaines spectraux extrêmes et les grands instruments

Les sources de luminance très élevée qui fonctionnent sur un très large domaine spectral ont été à l'origine de développements instrumentaux nouveaux pour l'imagerie et surtout la spectro-imagerie aux très courtes (par exemple ESRF pour les rayons X) ou aux grandes (par exemple CLIO pour l'infrarouge) longueurs d'onde. Avec l'ESRF la communauté scientifique Européenne peut bénéficier d'une plateforme opérationnelle de nano tomographie.

De la même façon les plateformes utilisant des lasers intenses ont permis de créer des faisceaux laser dans le domaine des rayons X ouvrant la voie à une imagerie directe ou une holographie à très haute résolution.

Les domaines spectraux de l'UV à vide et des rayons X ont largement bénéficié des progrès de l'optique diffractive incontournable dans un domaine où aucun matériau n'est transparent. Ces composants, fabriqués par des techniques lithographiques, dévient les faisceaux comme le font les réseaux de diffraction et non pas comme des lentilles réfractives.

Imagerie nucléaire

L'imagerie nucléaire consiste à mesurer au cours du temps la fixation spécifique d'un traceur radiomarqué, par un isotope β^+ en tomographie par émission de Positron (TEP) ou un émetteur γ en Tomographie par Émission MonoPhotonique (TEMP). Elle donne ainsi accès à une information spatiale (où est fixé le traceur ?) et à une information temporelle (quelle est la cinétique de fixation du traceur ?). La construction de la molécule spécifique d'une cible biologique et son marquage,

généralement réalisé par substitution ou ajout d'un atome radioactif à la molécule initiale, requièrent l'intervention de chimistes et de radio-chimistes. Comme pour la plupart des modalités d'imagerie biomédicale, la mise en œuvre de l'imagerie nucléaire requiert une participation hautement pluridisciplinaire comprenant chimistes, instrumentalistes, informaticiens, biologistes et médecins.

L'imagerie nucléaire possède 2 atouts majeurs :

- (i) Celui de posséder une sensibilité élevée puisqu'elle donne accès à la quantification de concentrations moléculaires allant jusqu'à 10^{-12} mole/l ;

- (ii) celui de bénéficier d'une très grande variété de molécules radio marquées. Parmi les applications on retiendra plus particulièrement la mesure du métabolisme énergétique grandement exploitée aujourd'hui en oncologie pour sa sensibilité, de la pharmacocinétique de molécules d'intérêt ou bien encore de l'expression génique (nouveau champ d'investigation de l'imagerie très prometteur).

À l'opposé, l'imagerie nucléaire présente plusieurs limites : elle ne fournit pas de données anatomiques et possède une résolution spatiale relativement faible (quelques millimètres chez l'homme). Enfin, mentionnons parmi les limites de l'imagerie nucléaire, son coût et sa difficulté de mise en œuvre, en particulier pour la TEP* qui nécessite des installations dédiées afin de produire les radioisotopes *in situ* étant donné la faiblesse de leur période radioactive.

Parmi les progrès récemment réalisés en imagerie nucléaire, une grande partie a été motivée par la nécessité d'associer cette technique à l'imagerie animale. L'enjeu était alors de taille puisqu'il s'agissait de réduire une résolution spatiale de l'ordre de 5 mm pour la TEP et de 1 cm pour le TEMP* adaptés à l'homme à une résolution de l'ordre du mm pour répondre aux dimensions de la souris. C'est dans le domaine de la TEP que ces progrès ont été les plus sensibles. Si toutefois la valeur de 1 mm n'a pas encore été atteinte, des systèmes possédant des résolutions inférieures à 2 mm sont désormais fonctionnels.

La très haute résolution et les microscopies à sondes locales

La microscopie électronique reste le domaine privilégié de l'observation des matériaux et des structures à une échelle allant de l'atome à quelques dizaines de nm. Avec l'essor des nanotechnologies elle est devenu un outil de visualisation incontournable mais aussi un outil de fabrication et d'analyse chimique qui a franchi un pas décisif avec l'introduction des sources à effet de champ.

Cependant dans de nombreux cas les microscopies à sondes locales s'avèrent plus adaptées et moins lourdes : dépasser les limites que l'on pensait être liées à la physique elle-même en terme de résolution a été certainement l'enjeu le plus spectaculaire de ces méthodes. Nous reviendrons plus loin sur cet aspect, soulignons ici la très large panoplie des grandeurs ou phénomènes physiques à l'origine des signaux qui sont révélés dans les images.

Le courant tunnel associé à la densité d'états électroniques a été à travers le STM* à l'origine d'une très large variété de méthodes capables de fournir des informations locales sous forme d'images.

Les microscopes à force atomique (AFM) révèlent la topographie des nano objets ou des nano structures mais permettent également d'accéder aux propriétés mécaniques locales de matériaux hétérogènes, composites ou de structures biologiques.

Aujourd'hui les images obtenues reflètent les propriétés magnétiques (nano bits), électriques, thermiques, électrochimiques, optiques etc. à des échelles comprises entre 0,1 nm et 100 nm.

Les images obtenues en champ proche optique (à des distances très inférieures à la longueur d'onde associée à la mesure) permettent de mettre en évidence des phénomènes physiques que l'on ne peut observer en champ lointain, comme l'émission thermique « anormale » ou la violation des règles de sélection liées à la taille du vecteur d'onde.

Les ultrasons revisités

Ce domaine de l'imagerie est typique de ce que l'on peut attendre d'un domaine fortement lié à la fois à la physique et à la médecine.

Les images ultrasonores sondent les propriétés élastiques de la matière, les évolutions techniques ont été spectaculaires et la qualité des images 3-D fait rêver.

Les ultrasons ne se propagent pas seulement dans des tissus mous (qui ont une impédance acoustique voisine de celle de l'eau) mais à travers des structures hétérogènes complexes, multi échelles, absorbantes ou diffusantes : les modèles physiques sont alors nécessaires pour interpréter et quantifier les résultats.

À côté des spectaculaires applications à l'ostéoporose, les ultrasons à haute fréquence révèlent des anomalies de structures au niveau cellulaire liées à des évolutions de parois ou aux dimensions des noyaux.

Dans le domaine basse fréquence l'absorption des ondes est faible et les équations de propagation sont, en régime linéaire, invariantes par renversement du temps. Il devient donc possible d'enregistrer la distribution du champ acoustique très largement muti-diffusé et de réémettre un champ focalisé spatialement et comprimé temporellement comme l'impulsion initiale.

Ces recherches ont ouvert la voie à une multitude d'études physiques fondamentales et appliquées : de l'auto focalisation des ultrasons pour la destruction des calculs rénaux à la réalisation de zones focales très inférieures à la longueur d'onde. De nouveaux concepts pour les télécommunications en présence de diffuseurs (comme les immeubles d'une ville) ont été également testés avec succès : ils sont applicables à d'autres types d'ondes, comme les ondes électromagnétiques du domaine hyperfréquence.

Le domaine non linéaire a également fortement progressé, de nouvelles formes de contraste et une meilleure résolution se manifestent avec les harmoniques mais également la possibilité d'induire des ondes de cisaillement capables de « palper » les tumeurs dans la profondeur des tissus.

Imagerie magnétique : des gaz polarisés aux champs très faibles

L'IRM est sans doute le domaine de l'imagerie médicale le plus performant aujourd'hui tant du point de vue des informations morphologiques que fonctionnelles. Le contraste est lié aux variations des temps de relaxation longitudinaux et transverses avec l'environnement, la présence de produits de contraste augmente encore les performances de ce mode d'imagerie. La précision atteinte pour l'observation du corps humain est de l'ordre du millimètre et s'applique aussi bien à l'observation de pathologies comme les lésions cérébrales, le développement anarchique de la microcirculation au voisinage d'une tumeur et bientôt les anomalies de la circulation coronaire. L'IRM fonctionnelle est également un outil qui a permis d'observer l'activation cérébrale grâce au suivi du métabolisme accompagnant l'accomplissement de tâches cognitives ou d'effets liés à l'inconscient.

Les gaz polarisés (He, Xe) s'avèrent très efficaces pour étudier les « volumes creux » comme les poumons par exemple. La faible densité de matière susceptible de fournir un signal lorsqu'on utilise un gaz est compensée par la forte baisse de la température de spin obtenue par pompage optique des spins nucléaires (méthode inventée par Alfred Kastler). Les images de poumons de gros fumeurs sont, à cet égard, très révélatrices des méfaits du tabac.

Des approches multimodales avec des contrastes couplés IRM-acoustique (visualisation des ondes de cisaillement) ou IRM-optique (sondes colorées pour guider le chirurgien) s'avèrent particulièrement prometteuses.

Enfin il est possible de réaliser des images en champ très faible grâce à des détecteurs ultra sensibles (des SQUID) fonctionnant à très basse température.

Les SQUIDS sont aussi utilisés pour une nouvelle imagerie qui connaît des développements spectaculaires dans le domaine de l'Imagerie Cérébrale avec la MEG qui permet de mesurer les champs très faibles émis par les

courants ioniques circulant dans les neurones (voir plus loin le paragraphe sur les applications médicales).

1.2 RÉSOLUTION, SENSIBILITÉ : LES LIMITES AUJOURD'HUI

En Imagerie la résolution spatiale est souvent un paramètre clef qui va « cataloguer » la méthode d'imagerie utilisée. Classiquement cette résolution est associée à la longueur d'onde utilisée, aussi les nouvelles sources de très haute luminance et fonctionnant à très courte longueur d'onde s'avèrent-elles précieuses. Elle est aussi associée à l'ouverture numérique de l'instrument (d'autant plus grande que le diamètre est grand pour une distance focale donnée). Si les microscopes optiques ou électroniques travaillent très près de la limite de diffraction, il n'en n'est pas de même pour les télescopes terrestres à cause des mouvements atmosphériques : l'optique adaptative a représenté un pas décisif pour atteindre cette résolution théorique.

C'est cependant l'utilisation de *sondes locales fonctionnant en champ proche* qui a permis de dépasser de plusieurs ordres de grandeur la limite imposée par la diffraction. L'imagerie quantique ou les matériaux gauches (à indices négatifs) permettront-ils d'aller encore plus loin en terme de résolution ?

La lithographie et les microscopies aux très courtes longueurs d'onde

La lithographie consiste à imposer une structure d'éclairement directement exploitable et non à véhiculer une information vers un observateur. Elle a joué un rôle décisif dans le monde des micro et nano technologies et ses développements touchent de larges pans de l'industrie *de haute technologie*. Ses limites marquent l'état de l'art en nombre de points particulièrement en richesse d'image (mieux

que 100 nm sur un champ de 2 par 2 cm). On sait que, la limite de la diffraction en UV à vide (193 nm) étant atteinte, il faut maintenant envisager le saut à travers le domaine UV lointain (autour de 100 nm, où pratiquement aucun matériau réfractif n'est utilisable) et passer à l'extrême UV à 13 nm, où des miroirs de réflectivité 72 % sont disponibles et permettent de concevoir des combinaisons optiques performantes.

Les limites aujourd'hui en imagerie de photons XUV / EUV est de l'ordre de 30 nm en imagerie d'absorption pure avec des optiques diffractives. Ce dernier exemple fournit aussi un cas de résolution extrême en microscopie par ondes électromagnétiques, qui est parfois dépassé par la microscopie à balayage et par les microscopies de champ proche.

L'optique adaptative, l'astronomie terrestre et spatiale.

En astronomie la résolution spatiale est un objet d'attention toute particulière, et a fait d'immenses progrès dans les deux dernières décennies, sur toute l'étendue du spectre électromagnétique. En particulier :

- La compréhension du processus d'imagerie à travers le milieu inhomogène qu'est l'atmosphère terrestre a conduit les astronomes à franchir la barrière du *seeing* (résolution limitée par la turbulence à environ 1 seconde d'angle), d'abord par l'interférométrie des tavelures dans le visible et l'infrarouge (1970-1980) puis surtout par le développement de l'optique adaptative depuis 1989. Tous les grands télescopes au sol (classe 4 à 10 m) utilisent désormais cette technique pour atteindre leur limite de diffraction, avec des résolutions de l'ordre de 10 milliseconde d'angle autour de 1 micromètre de longueur d'onde ;

- la capacité de combiner plusieurs télescopes de façon cohérente depuis la surface terrestre, bien connue en radio-interférométrie, est devenue accessible au domaine optique (visible et infrarouge) depuis 1970 et conduit aujourd'hui à des interféromètres à base hectométrique, tels le Very Large Telescope

Interferometer européen au Chili (4 télescopes de 8,2 m et 4 télescopes de 1,8 m) ou le Keck Telescope d'Hawaii (2 x 10 m) ;

– la couverture opérationnelle de ces instruments en fréquences spatiales est encore limitée, et ils ne produisent pas d'images à proprement parler. Leurs mesures en certaines valeurs du spectre de fréquences spatiales doivent être confrontées aux modèles pour établir la validité de ces derniers.

Les microscopies à sondes locales et les « champ proches »

Sans entrer dans le subtil domaine des forces de Casimir, le suivi d'une surface par la fine pointe d'un microscope à force atomique est devenu une opération quasi-routinière. Dépasser la limite « physique » de la diffraction pour les instruments utilisant des ondes a été le mérite principal des microscopies dites de « champ proche » comme le SNOM.

Cette limite de résolution est liée à la propagation des ondes EM entre l'objet, le système imageur (objectif) et le capteur : les informations dont l'extension spatiale est inférieure à la demie longueur d'onde ne se propagent pas mais restent localisées au voisinage de l'objet sous forme d'ondes évanescentes. Pour atteindre cette distribution locale de champ il faut sonder l'objet à des distances très inférieures à la longueur d'onde. C'est ce qui est fait avec des nano ouvertures qui émettent ou captent le champ local ou des nano antennes qui le diffusent vers le champ lointain. La résolution, de l'ordre de 10 nm reste indépendante de la longueur d'onde de l'UV à l'IR et des études sont en cours dans le domaine THz.

Une application incontournable de ces approches expérimentales se situe dans le domaine de la propagation guidée : avec les guides classiques de l'optique intégrée pour les télécommunications et surtout l'exploration des champs dans les structures à gap de photons ou dans les structures guidantes de tailles nanométriques (plots) et plus généralement dans le domaine de la « plasmonique ».

Signalons enfin que le champ proche n'est pas exclusivement lié aux microscopies : le stéthoscope de médecin révèle des anomalies acoustiques très inférieures à la longueur d'onde et les gradients de champ très localisés en IRM permettent d'atteindre des résolutions largement inférieures au mm pour des longueurs d'onde de l'ordre du mètre, enfin les puits acoustiques en champ proche permettent de focaliser un faisceau d'ultrasons bien en dessous de la longueur d'onde.

Il faut enfin parler de la vague de méthodes nouvelles en microscopie de champ lointain, développées en particulier pour la biologie, où une augmentation de résolution est obtenue par diverses voies très astucieuses utilisant des interférences entre des objectifs disposés sur « 4π » stéradians ou encore l'émission stimulée pour vider spatialement les états excités et ne garder qu'une nano source (~ 50 nm) fluorescente.

Limitations quantiques à l'imagerie optique

La nature quantique de la lumière introduit des fluctuations (ou bruit quantique) qui vont se répercuter sur la qualité des images optiques et qui vont apporter des limitations sur les informations issues de ces images. L'étude du bruit quantique dans les images et des moyens éventuels pour le réduire est un thème d'étude, appelé « imagerie quantique » (« *quantum imaging* ») qui a émergé dans les années 90 et qui se développe actuellement rapidement en Europe et aux USA. Il s'intéresse aussi bien au régime de comptage de photons, où l'aspect quantique du rayonnement intervient directement, qu'en régime de champ intense, où chaque pixel est affecté de fluctuations quantiques.

Différents chercheurs ont déjà abordé le sujet des limites quantiques à la résolution spatiale, et des moyens de détecter des détails plus petits que la longueur d'onde en les faisant sortir du bruit par des techniques de réduction des fluctuations quantiques. Ce sujet qui n'en

est qu'à ses balbutiements est amené à se développer tant les concepts fondamentaux et les applications à tester sont nombreux.

Un problème plus simple consiste à extraire d'une image un petit nombre d'informations impossibles à déterminer grâce à la simple connaissance de son intensité totale : positionnement de son centre, détermination du déplacement d'un petit objet dans celle-ci, position d'un objet très faiblement diffusant ou absorbant, etc.

Il existe des méthodes qui permettent d'ores et déjà de déterminer certaines de ces informations avec une très grande sensibilité, et de battre la limite de diffraction dans ces déterminations. Il a été démontré théoriquement, mais aussi expérimentalement, qu'on pouvait repousser ces limites à des valeurs encore plus faibles en étendant aux images les techniques de réduction du bruit quantique développées pour les faisceaux monomodes. Ici aussi, le sujet est dans son enfance, et on peut s'attendre à de nombreux développements futurs. Ils concerneront en particulier l'étude quantique de nombreux dispositifs de traitement ultra-sensible des images optiques. En particulier, le problème de la lecture optique de données stockées sur un disque en utilisant des bits séparés d'une distance inférieure à la longueur d'onde, par son importance au niveau des applications, sera l'objet d'études approfondies.

Enfin, il existe un domaine pratiquement vierge, mais qui apparaît prometteur et en tout cas qui mérite une attention particulière : c'est celui de l'information quantique des images optiques, dans lequel on tirerait profit à la fois des propriétés spécifiques de l'intrication quantique entre différents modes du champ électromagnétique et du parallélisme intrinsèque de l'information contenue dans une image pour faire du traitement quantique massivement parallèle de l'information.

La France est bien placée dans ce type de recherches, qui s'appuient sur toute une école de pensée d'optique quantique initiée par A. Kastler.

1.3 LES INSTRUMENTS ET LES MÉTHODES

Nous avons décrit ci-dessus quelques approches expérimentales qui ont conduit à de nouvelles générations d'instruments ou d'approches expérimentales. Des progrès de l'imagerie pour le domaine biologique (microscopie linéaire et non linéaire) à celui de l'astronomie (au sol comme depuis des observatoires spatiaux) les performances viennent d'abord du progrès des détecteurs :

- Détecteurs numérisant directement le signal (CCD) depuis les rayons X jusqu'à l'infrarouge proche ;

- format des détecteurs, dépassant 10k x 10k pixels, et de plus susceptibles d'être disposés en larges mosaïques, dépassant le format des plaques photographiques ;

- sensibilité de ces détecteurs dont le bruit de lecture tend vers zéro (aujourd'hui un à quelques électrons rms), permettant d'atteindre la limite quantique du bruit photonique ;

- rendement quantique de conversion photon-électron, qui approche désormais l'unité sur la quasi-totalité du domaine spectral considéré ;

- rapidité de lecture, particulièrement précieuse pour les applications au sol dans les domaines visible et infrarouge, où l'optique adaptative contraint d'opérer à des fréquences de lecture pouvant approcher le kHz.

Des progrès importants restent à accomplir dans le domaine submillimétrique (100 à 1 000 micromètres) où des mosaïques de photoconducteurs (e.g. GeGa comprimé) ou de bolomètres sont disponibles, mais encore sous des formats modestes.

Pour ce qui est de *l'imagerie biologique* la révolution récente se fait autour de la microscopie de *nano-objets individuels* :

Cette nouvelle microscopie élimine complètement tout effet de moyenne et révèle l'hétérogénéité de populations ainsi que les

fluctuations dynamiques d'individus. En particulier, le marquage par des molécules fluorescentes de macromolécules en environnement physiologique permet d'étudier leur activité, leur conformation ou encore leur dynamique conformationnelle, sans qu'aucune perturbation ou synchronisation ne soit nécessaire. On étudie ainsi la dynamique de récepteurs de neurotransmetteurs sur des neurones vivants par microscopie de fluorescence de molécules individuelles. Cette technique permet d'étudier les propriétés de diffusion de récepteurs dans des milieux restreints comme les synapses. Elle souffre cependant du problème de photo blanchiment qui limite sévèrement les temps de mesure sur des molécules uniques.

Pour contourner le problème du photo blanchiment qui limite sévèrement les temps de mesure sur des molécules uniques fluorescentes, de nouvelles sondes les « quantum dots » semi-conducteurs de tailles nanométriques ayant un très bon rendement de fluorescence, un spectre étroit dépendant de leur taille (confinement quantique) et une très bonne résistance au photo blanchiment ont été synthétisées et fonctionnalisées. Très récemment des effets analogues ont été observés avec des agrégats métalliques.

Enfin une nouvelle méthode de détection de nano particules métalliques uniques basée sur l'effet photo thermique a été mise au point. Cette méthode ouvre de nouvelles perspectives pour l'imagerie en biologie puisqu'elle est utilisable en milieux diffusants de type cellulaires.

D'autres méthodes tirent partie de l'interaction électronique entre deux nano objets voisins (molécules ou nano particules) associés à des réactions biologiques (reconnaissance par exemple), c'est le FRET* et les méthodes dérivées : un transfert non radiatif se produit entre une molécule fluorescente dans un état excité, le donneur, et une molécule voisine dans son état fondamental, l'accepteur. L'accepteur émet à une longueur d'onde différente et la fluorescence du donneur se trouve réduite.

Parfois le rôle de l'entité voisine de l'émetteur est de bloquer la fluorescence en induisant des transitions non radiatives vers

l'état fondamental : c'est ce qui se produit lorsqu'une molécule fluorescente se trouve proche d'une autre molécule non fluorescente ou de nano particules métalliques. On réalise ainsi des balises moléculaires qui émettent lorsque l'on on sépare la molécule de l'entité bloquante.

2 – LE TRAITEMENT DES IMAGES

Dans ce domaine, des progrès considérables ont été accomplis depuis deux décennies grâce à la numérisation des données d'observation pixellisées, aux outils informatiques disponibles et aux développements mathématiques associés.

De nombreuses techniques, largement transdisciplinaires (astronomie, médecine, photographie, biologie) et disposant d'algorithmes rapides, sont apparues et sont désormais utilisées : restauration d'image par déconvolution, maximum d'entropie, filtrage adaptatif, reconnaissance de formes. Le caractère souvent empirique de ces méthodes, notamment dans les cas non-linéaires, s'est effacé au profit de théories mathématiques plus correctes quant à la validité de ces méthodes (solution unique, estimateurs de bruit). Leurs limites sont encore souvent le temps de calcul, mais ces progrès ont largement contribué à la qualité et à l'interprétation correcte des images.

En astronomie par exemple, le signal mesuré correspond souvent à l'intégrale d'une quantité physique caractérisant localement l'objet étudié. Remonter à cette dernière est indispensable pour une description correcte de l'objet : il s'agit donc d'un problème d'inversion des mesures. Sa solution est plus pertinente et plus profonde que la démarche, fréquente, consistant à comparer la valeur observée à celle prédite par un modèle, dans lequel est faite l'intégration. Les progrès mathématiques sur la solution des problèmes inverses, renforcés

par la puissance de calcul disponible, contribuent largement à la qualité de l'interprétation des observations.

2.1 NÉCESSITÉ DU TRAITEMENT

Le développement de nouvelles modalités d'imagerie et une exploitation efficace des modalités existantes ne manquent pas de poser de nouveaux défis à la communauté : gestion et analyse de données hyperspectrales (plus d'une centaine de canaux), problèmes de reconstruction dans le cadre de modèles physiques complexes fortement non linéaires, traitements des images nécessitant une prise en compte de la physique de leur formation, fusion de grandes masses de données spatiales et temporelles, n-dimensionnelles (3D, 4D avec le spectre, 5D avec l'évolution temporelle, 6D avec la polarisation, etc.), multimodales et fortement hétérogènes, analyse et interprétation de ces données.

La prise en compte de la complexité et variabilité croissante apportée par les systèmes imageurs récents rend ainsi nécessaire le développement de nouveaux paradigmes de traitement associant modèles, représentations, algorithmes et architectures innovants. Les besoins s'expriment tout autant pour des traitements génériques « classiques » (codage et compression, amélioration, restauration et déconvolution, recalage et fusion, détection, segmentation, suivi temporel, reconnaissance et interprétation) que pour des traitements spécifiques liés à chaque domaine thématique (astronomie, télédétection, imagerie médicale, imagerie vidéo, etc.). Dans de nombreux cas, l'automatisme et la reproductibilité des traitements reste un enjeu majeur. Dans d'autres cas, l'opérateur, le thématique ou le praticien doivent être intégrés dans la boucle de traitement et de décision dans des systèmes sophistiqués d'interaction homme-machine ou de réalité augmentée. Dans de nombreux domaines (télésurveillance, imagerie et robotique médicale) on assiste par ailleurs à une

interaction de plus en plus forte entre la perception (image et son traitement) et l'action (assurée par des systèmes commandés, voire des systèmes robotiques), marquant le passage du paradigme classique de la vision artificielle passive à celui de la vision active. Le développement de systèmes de commandes référencés vision, réunissant spécialistes de traitement des images, roboticiens et automaticiens en sont une illustration.

2.2 MATHÉMATIQUES DES IMAGES

L'analyse et l'interprétation des images passent par une nécessaire phase de modélisation, allant de la représentation de l'image comme une simple collection de « pixels » ou « voxels » jusqu'aux représentations de haut niveau que sont les modèles d'apparence globaux, les modèles déformables ou les atlas numériques. Le développement de modèles évolués d'images, flexibles, parcimonieux, se prêtant à l'apprentissage et susceptibles de conduire à des traitements entièrement automatiques a ainsi mobilisé une partie importante de la communauté.

Des avancées significatives ont été obtenues dans plusieurs directions, tout d'abord dans la concrétisation d'acquis théoriques et méthodologiques antérieurs. Les approches multi résolutions (ondelettes et modèles associés) ont ainsi connu des applications variées, en débruitage et restauration d'images par exemple et ont conduit au développement de nouvelles normes de compression (JPEG 2000).

De nouveaux modèles et paradigmes (dans des cadres variés : déterministes, stochastiques, discrets, continus) sont apparus, en partie grâce à l'intérêt de plus en plus marqué de la communauté des mathématiques appliquées pour l'analyse d'images. Les représentations par ondelettes ont été déclinées sous des formes nouvelles à travers les « bandelettes », adaptées à la représentation de primitives géométriques éparées.

Les acquis précédents sur les modèles markoviens 2D d'images ont été mis à profit pour développer de nouveaux modèles définis sur des structures de graphes hiérarchiques (2D et 3D), se prêtant à l'apprentissage non supervisé et à des traitements particulièrement rapides. Des avancées ont également été obtenues dans la représentation globale des images par des modèles statistiques parcimonieux non markoviens non gaussiens et non stationnaires permettant la représentation de classes d'images très variées (visages, textures, structures anatomiques, objets astronomiques, etc.), en relation avec des techniques de réduction de dimensionnalité ou des modèles à variables latentes (Analyse en Composantes Principales non linéaire, Analyse en Composantes Indépendantes, ACP probabiliste, méthodes à noyaux, approches neuromimétiques, etc.). Ces développements débouchent sur des techniques de représentation et d'analyse efficaces des données spatio-temporelles multi-spectrales de très grande dimensionnalité rencontrées par exemple en astronomie ou sur l'émergence d'atlas probabilistes multimodaux en imagerie médicale, qui sont en mesure de synthétiser les variabilités observées sur une vaste population. Les travaux sur les modèles stochastiques de primitives géométriques (modèles markoviens, processus ponctuels) ont conduit à des algorithmes de segmentation ou d'extraction d'information, adaptables à de nombreux domaines. Les méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov ont commencé à connaître une large diffusion dans la communauté avec le développement de l'inférence bayésienne pour des modèles stochastiques variés (modèles markoviens sur des graphes, processus ponctuels), le succès des techniques séquentielles de filtrage particulière et des méthodes à saut réversible. Les applications incluent le suivi et la reconnaissance de formes en mouvement, la segmentation automatique de scènes complexes et la résolution de certains problèmes inverses.

Des progrès importants ont par ailleurs été réalisés dans le cadre des approches continues, variationnelles ou à base d'EDP. Les problèmes génériques de représentation des

formes ont connu des développements théoriques importants, à travers les travaux sur les contours actifs géométriques et géodésiques, les représentations par ensembles de niveaux, dans un cadre tout d'abord déterministe, puis plus récemment à travers des extensions statistiques. De nombreuses applications en segmentation en ont résulté. La représentation de déformations entre images ou structures a également été un domaine très actif, soutenu par une demande croissante de techniques de recalage non rigides 3D+t performantes. Des avancées théoriques importantes sont ainsi en cours, sur la représentation des déformations dans des espaces de grande dimension ou de dimension infinie (définition d'espaces de formes et métriques associées, modèles de difféomorphismes). Des retombées sont d'ores et déjà observées en imagerie médicale (recalage déformable inter-patients, recalage patient-atlas).

2.3 PROBLÈMES INVERSES

L'imagerie classique est essentiellement un *problème inverse de sources* car bien que l'objet soit souvent passif, l'image est une représentation sous forme de source(s). L'objet-source se caractérise par un certain nombre de paramètres indiquant sa localisation, sa forme et taille, l'intensité et la couleur de la lumière émise. Les paramètres manquants, notamment les constantes optiques (e.g., indice de réfraction) et mécaniques (e.g., densité, rigidité) de l'objet passif, ne figurent pas explicitement dans l'image (c'est pourquoi l'image n'est qu'une représentation de l'objet), mais sont reconstruits en quelque sorte, en cas de besoin, par le cerveau de celui qui la regarde. De même, le cerveau supplée souvent le manque de dimensions de l'image (2D sur une photographie pour un objet 3D), même sans vision binoculaire (deux yeux enregistrant le même objet sous des angles différents).

Cependant dans de nombreux cas, les informations pertinentes ne peuvent pas être déduites simplement des images acquises, et il

est nécessaire d'avoir recours à des méthodes dites inverses. Les deux problèmes à résoudre dans ce cas sont la modélisation de la mesure (acquisition du champ électromagnétique ou acoustique), dit *problème direct*, et la formation, à partir des ensembles de données recueillis (appelé ici pseudo-image ou encore projections en imagerie médicale), de l'image elle-même, dit *problème inverse*.

Le problème direct est soit un problème d'acquisition des données relatives au champ ondulatoire dans, sur, ou hors de l'objet sollicité par l'onde interrogatrice, soit un problème de simulation de ces mesures, i.e., prédiction (par le calcul) du champ aux positions des capteurs (fictifs), en supposant un modèle assez complet du champ incident et de son interaction avec l'objet ou milieu (modélisé, lui aussi, de manière assez réaliste).

Le résultat des mesures réelles ou simulées est un signal en chaque position des capteurs, évoluant ou non avec le temps selon que la sollicitation soit de type monochromatique ou impulsif. La pseudo-image peut alors prendre diverses formes. Par exemple, lorsque la sollicitation est de type lumière monochromatique, elle peut être une distribution spatiale d'intensité lumineuse enregistrée par un système planaire de capteurs CCD* Les capteurs peuvent aussi être situés sur une sphère ou un cylindre englobant partiellement ou totalement l'objet au lieu de se trouver tous dans un même plan. Les capteurs ainsi que les sources de l'onde interrogatrice peuvent même se trouver au sein de l'objet (comme dans l'imagerie sismique et certaines applications d'imagerie médicale). Aussi, l'objet peut être interrogé par plusieurs ondes (issues de sources ayant des positions et/ou des fréquences différentes), démultipliant d'autant le nombre de pseudo-images devant être traitées dans la seconde phase de l'inversion.

Un des problèmes essentiels est de savoir comment choisir le nombre, la nature et la qualité (taux de bruit) des pseudo images nécessaires pour produire une qualité donnée d'image (taux de ressemblance de celui-ci avec l'objet). Souvent, on n'est pas entièrement

maître du positionnement et du nombre des sources et des capteurs, de sorte que se pose le problème de l'incidence de ces limitations sur la qualité de l'image. Aussi, il n'est pas toujours simple d'exploiter au mieux l'information temporelle de la pseudo image.

L'ensemble des pseudos images constitue les données pour le problème inverse, les inconnues étant les paramètres physiques d'intérêt en chaque point de l'objet. La résolution de celui-ci dans le cadre de l'INC* s'effectue essentiellement par des moyens numériques. Un grand nombre de problèmes se pose pour la réalisation de ces problèmes inverses, car le plus souvent le système d'équations à résoudre est indéterminé, il peut y avoir beaucoup plus d'inconnues que le nombre de données, ou encore le système n'admet pas de solution unique. D'autre part le plus souvent le problème est dit mal conditionné, et est alors très sensible au bruit dans les mesures. Il faut alors introduire dans le problème inverse des méthodes dites de régularisation, qui consistent à ajouter des *a priori* sur la forme des objets à reconstruire (distributions lisses ou continues par morceau). Ces problèmes font l'objet en France de recherches dans le domaine des mathématiques appliquées, du traitement du signal et des images, et ont de nombreuses applications dans des domaines comme le contrôle non destructif, l'imagerie médicale, la géologie ou l'astrophysique.

2.4 FUSION

Le domaine de la fusion d'informations connaît depuis plusieurs années une forte évolution, rapide et foisonnante. Dans ce contexte dynamique, le domaine se situe actuellement à une étape charnière. Après une phase de questions, de discussions, voire d'errements, où le domaine de la fusion en traitement des images n'était pas bien défini, nous sommes maintenant arrivés à une bonne maîtrise des outils de base (souvent importés d'autres domaines) et il est désormais possible

d'une part de mener des applications de bout en bout, et d'autre part de développer des outils plus complexes et plus sophistiqués.

Il reste néanmoins beaucoup de travail théorique à conduire pour élargir les bases de ces méthodes et de travaux expérimentaux pour en valider l'utilisation.

De nombreux laboratoires CNRS ont participé activement au développement de ce domaine, il s'agit d'une part des principes généraux de la fusion et ses spécificités en traitement du signal, en traitement des images et en robotique, et d'autre part des méthodes et outils principaux, essentiellement numériques (probabilités, fonctions de croyance, ensembles flous et possibilités).

Le bilan des acquis fait état d'une grande variété de techniques numériques utilisées pour la fusion d'informations imprécises et incertaines. Ce foisonnement est dû à la variété des tâches qui contribuent à la décision dans un système d'informations multi sources.

Les approches probabilistes restent les plus utilisées, surtout parce qu'elles ont donné lieu au développement d'outils aboutis et d'un grand savoir-faire, résultant d'une longue pratique.

Au niveau de la décision, ces outils se révèlent particulièrement efficaces, alors qu'au niveau de la modélisation plusieurs aspects restent limités voire critiquables.

La théorie des ensembles flous repose sur une modélisation proche de l'intuition. Dans les applications de fusion en image, l'étape de décision reste encore peu formalisée et peu développée. En revanche, l'étape de combinaison est très riche et permet d'introduire nombre de connaissances, de tous types. La théorie des fonctions de croyance offre les outils de modélisation les plus puissants, permettant simplement et efficacement l'introduction de connaissances, de l'imprécision et de l'incertitude. La combinaison, telle qu'elle est utilisée en traitement des images, est restreinte au mode conjonctif. De nombreux développements ont vu le jour, en particulier pour les applications typiques de classification

multisource, de reconnaissance de structures ou d'objets dans les images, de suivi, de localisation et de planification.

Malgré ces avancées, certains points restent obscurs ou nécessitent plus de développement. La prise en compte de l'origine des données et des connaissances, ainsi que des relations entre les sources est encore souvent effectuée de manière supervisée et elle nécessite donc un peu d'expérience. Une question très difficile est celle de la gestion du conflit. Dans la mesure du possible, on cherchera à identifier les sources du conflit et à les expliciter pour éviter les incohérences au moment de la décision. En particulier il n'est pas toujours facile de différencier le conflit de la complémentarité des sources, ni de savoir s'il doit être résolu ou non.

Le choix des méthodes et leur évaluation sont aussi cruciaux que difficiles. Là encore, il n'existe pas de solution générale pour le choix des méthodes adaptées aux types d'informations et de connaissances manipulées, ainsi qu'aux applications visées.

L'évaluation des méthodes peut être plus ou moins facile suivant que l'on a accès à la vérité ou non. Les essais de comparaison des approches numériques de fusion, appliquées aux mêmes problèmes, ont souvent donné des résultats contradictoires, et ont donc échoué. Nous pensons que la raison essentielle est que chaque problème s'exprime plus facilement dans une théorie que dans une autre, et que sa résolution par des outils non adaptés nécessite donc des distorsions de ces techniques et n'a pas beaucoup de sens.

Enfin, un constat est que chacune des approches est adaptée à un ensemble limité d'imperfections des informations à fusionner. Il est rare que toutes les imperfections soient modélisées simultanément et simplement dans une théorie unique. Ainsi, un champ d'investigation encore ouvert concerne la fusion de méthodes ou l'utilisation conjointe de différents formalismes complémentaires.

3 – CONCLUSION

Bien que certainement incomplète, notre analyse a été illustrée par des exemples pris dans de nombreux domaines scientifiques. Cet aspect multidisciplinaire est à la fois une richesse pour la thématique « image » (il y a une nécessaire fertilisation croisée très active aux interfaces pour appliquer des approches naissantes ou pour lancer de nouveaux défis) et une difficulté car la chaîne de compétences nécessaires pour couvrir un sujet déborde souvent largement le cadre d'un unique laboratoire.

Selon la maturité de l'approche ou les moyens à mettre en œuvre on pourra envisager une application rapide et alors le voisinage de chercheurs de cultures différentes stimulera les recherches voire des valorisations industrielles ; dans d'autres cas il faudra prendre le temps d'affiner les concepts, laisser les experts travailler sur le long terme et les aider à faire mûrir le sujet.

Il n'y a sans doute pas d'autres règles que de recommander la souplesse dans la gestion des projets. On voit aussi que la responsabilité des comités scientifiques, des rapporteurs d'appels d'offres ou des responsables de la valorisation devient cruciale. Il faut pouvoir moduler les efforts, accélérer le rythme des recherches par des aides en matériel et en personnel (en ce sens les ingénieurs de valorisation constituent une initiative à développer) et surtout *évaluer a posteriori* (ce que nous faisons hélas trop rarement et trop mal, alors que l'évaluation *a priori* est souvent sérieuse et sélective).

Pour ne pas se cantonner à ces considérations sans doute trop générales, mais pour entrer dans le vif du sujet sans exhaustivité nous n'aborderons les perspectives de l'imagerie que dans deux domaines où l'image joue un rôle important et constituent un stimulant pour les autres disciplines : *l'imagerie médicale et l'astronomie*.

3.1 PERSPECTIVES EN IMAGERIE MÉDICALE

L'évolution extrêmement rapide des méthodes d'imagerie médicale au cours des deux dernières décennies, aura nécessairement des répercussions importantes en Médecine. Par exemple, au delà de l'imagerie pour le diagnostic médical, se développent des méthodes d'imagerie pour aider les interventions thérapeutiques, comme les actes chirurgicaux ou les examens de radiothérapie. Les progrès d'imagerie en Médecine Nucléaire et en IRM vont bientôt permettre d'associer une véritable imagerie lors de ces interventions.

Mais plus encore les avancées dans ces méthodes seront aussi utiles pour un domaine très vaste de la Recherche :

- En biologie humaine tout d'abord, l'imagerie médicale constitue le moyen le plus efficace de mesurer, de manière localisée dans le corps humain, plusieurs dizaines de paramètres différents avec une innocuité totale pour les volontaires et les patients. Par exemple grâce, au suivi d'une même cellule (ou organe ou région subcellulaire) il a été possible de mettre en évidence des phénomènes biologiques (variation du potentiel de membrane mitochondriale lors de l'apoptose, interactions entre facteurs protéiques spécifiques lors de l'auto organisation de la chromatine en cellule vivante) qui n'auraient pas pu être révélés avec des études sur un ensemble de cellules (moyennage des effets) ;

- en physiologie cardiaque et vasculaire, les chercheurs intégreront également les moyens totalement atraumatiques de mesure des vitesses, accélérations, gradients de pression et autres paramètres hémodynamiques que permettent d'atteindre l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) ou l'imagerie ultrasonore ;

- en Neurosciences et en Sciences Cognitives, des progrès sur la compréhension du fonctionnement du cerveau et sur l'étude des grandes pathologies neurologiques ont été obtenues grâce au développement des

méthodes d'Imagerie Cérébrale Fonctionnelle (TEP, IRM fonctionnelle, MEG et EEG), qui permettent d'imager chez l'homme *in vivo* et de façon non invasive le cerveau en action ;

– en génétique. Il est en effet difficilement imaginable de mettre au point de nouvelles méthodes de thérapie génique sans avoir les moyens, par l'imagerie médicale, de suivre leurs effets longitudinalement chez l'animal et par la suite d'assurer un suivi thérapeutique des patients ;

– dans toutes les recherches nécessitant une expérimentation animale, les méthodes issues de l'imagerie humaine permettent des études *in vivo* et un suivi longitudinal tout en diminuant le nombre d'animaux sacrifiés pour les besoins de la recherche.

Conscients de cette évolution, ces chercheurs exercent une pression considérable pour accéder à ces nouveaux moyens d'exploration, souvent au sein d'hôpitaux déjà sur-saturés par les besoins du diagnostic clinique. Pour prendre en compte ce besoin, les organismes de recherche devront devenir des acteurs essentiels dans les progrès et l'utilisation de l'imagerie médicale à des fins de recherche. Si l'application médicale reste un but essentiel des méthodes d'imagerie atraumatique, elle n'en est plus le seul enjeu et les systèmes d'imagerie médicale doivent être maintenant considérés aussi comme des outils de recherche en Sciences de la Vie. S'étendre au-delà du strict domaine médical, aurait de plus l'avantage de stimuler la recherche de nouveaux paramètres mesurables en imagerie, dont les médecins n'ont pas un besoin immédiat dans leur pratique diagnostique mais dont les chercheurs, à l'affût de tous paramètres quantifiables des processus du vivant, pourraient faire grand usage.

3.2 PERSPECTIVES DANS LE DOMAINE DE L'ASTRONOMIE

Nous avons signalé plus haut le rôle primordial des détecteurs dans tous les problèmes d'imagerie. Une perspective intéressante, dont

les retombées économiques seront loin d'être négligeables, commence à voir le jour : pouvoir *regrouper les variables spectrales et spatiales* en disposant de pixels présentant un codage spectral individuel. Déjà certains capteurs CCD au silicium sont capables de distinguer les couleurs fondamentales sur un même pixel (sans utiliser de filtres mais en tirant partie de la profondeur de pénétration des ondes de longueurs d'onde différentes). Les STJ* (supra-conducting tunnel junction), dont les premiers prototypes deviennent disponibles, représentent dans le visible et l'infrarouge proche un développement prometteur par leur sélectivité spectrale.

L'optique adaptative est largement implantée sur les télescopes terrestres. Cette méthode si elle se généralisait à d'autres domaines de l'imagerie permettrait d'augmenter les performances de systèmes de qualités insuffisantes ou limités par l'inhomogénéité des milieux dans lesquels se propage la lumière. Notons à ce sujet une retombée intéressante de l'optique adaptative en ophtalmologie : elle consiste à corriger les importantes aberrations de l'œil à pleine ouverture de la pupille pour observer l'état des cellules rétiniennes ou pour améliorer la vision (super-vision).

Néanmoins, la voie de synthèse d'ouverture, suivie en radio-astronomie et déjà démontrée en interférométrie optique, fait partie de la conception de ces instruments, et d'ici une décennie de véritables images dotées de plusieurs dizaines ou centaines de millions de pixels deviendront disponibles. L'extension vers des bases kilométriques fera passer la résolution de la milliseconde d'angle à dix fois mieux : cette extension est rendue notamment possible par le transport cohérent de la lumière entre télescopes grâce aux fibres optiques monomodes (visible et proche infrarouge). Un projet français (OHANA) vise ainsi à coupler les télescopes géants du sommet de Mauna Kea (Hawaii).

La mise en orbite d'interféromètres éliminera les problèmes de phases turbulentes causées par l'atmosphère terrestre, ainsi que les lignes à retard optiques imposées par la rotation de la Terre. Leur précision astrométrique, l'étendue

potentielle de leur base (vers la centaine de kilomètres) et leur sensibilité en feront des outils essentiels à l'imagerie des exoplanètes ou à celle des noyaux actifs de galaxies (projets Space Interferometer Mission ou Terrestrial Planet Finder de la NASA, projet IRSI/Darwin de l'Agence spatiale européenne).

L'extension de l'interférométrie vers l'imagerie X est déjà envisagée, utilisant une flottille de télescopes et un foyer indépendant vers 0,1 keV (projet MAXIM). Un tel outil est le seul aujourd'hui envisageable pour donner, avec une résolution de l'ordre de 0,1 micro-seconde d'angle, l'image de l'environnement immédiat d'un trou noir.

Enfin divers projets à travers les mondes (VIRGO pour la France et l'Italie, GEO pour l'Allemagne et le Royaume Uni, LIGO aux USA, AIGO en Australie, TAMA au Japon) visent à détecter, grâce à des antennes interférométriques terrestres large bande et d'une grande sensibilité, pour la première fois de façon directe les *ondes de gravitations* souvent associées à des événements astrophysiques violents. La mise en réseau de ces antennes ouvrira la voie à une astronomie nouvelle et répondra peut-être aux grandes questions comme la masse cachée de l'univers. Dans une vingtaine d'années l'astronomie par ondes gravitationnelles fera partie intégrante de l'astronomie multi modalité : ces signaux seront associés aux rayons X, à l'optique visible et infrarouge et aux ondes radio.

4 – LE DOMAINE DE L'IMAGE EN FRANCE : QUELLES PERSPECTIVES ?

La thématique possède incontestablement des points forts non seulement au CNRS mais dans d'autres autres organismes souvent plus proches de la technologie. Elle génère en effet des idées et des travaux de valeur : les

laboratoires français publient dans des revues de haut niveau, leur contribution au domaine de l'imagerie est reconnue internationalement, les étudiants formés en France sont prisés et n'ont pas de mal à trouver de post-doc à l'étranger (souvent ils ne reviennent plus en France !).

Plusieurs Départements du CNRS ont accepté l'idée que la recherche en imagerie constituait un domaine transversal à privilégier tant l'enjeu scientifique s'avère d'importance : une section pluridisciplinaire du Comité National couvre les applications en Sciences de la Vie de l'imagerie.

De nombreuses avancées récentes, déterminantes en traitement des images, se sont enrichies de travaux théoriques, parfois très en amont. Ces avancées se sont parfois très rapidement, traduites par des retombées concrètes dans les applications ou par la définition de normes nouvelles. Au CNRS, par exemple, la recherche en amont sur les mathématiques pour l'imagerie bénéficie des meilleures compétences dans le domaine, comme en attestent la très large diffusion des travaux de nombreux groupes de recherches. Les domaines d'excellence incluent ainsi les modèles stochastiques, les approches continues (variationnelles, EDP) ainsi que les approches discrètes (géométrie discrète, etc.). Il apparaît donc primordial de favoriser la synergie entre les recherches en amont (mathématiques de l'image) et en aval dans le domaine, par la mise en place de structures appropriées au niveau national (politique incitative de collaboration, inter-GDR) et le renforcement des équipes pluridisciplinaires existantes.

De façon plus générale, les nombreux défis qui se posent actuellement en imagerie, ne pourront être relevés qu'en favorisant, de façon plus incitative que par le passé, les rapprochements entre physiciens, traiteurs de signaux et d'images, mathématiciens appliqués, informaticien, thématiciens et les groupes demandeurs d'innovations (praticiens, biologistes, géophysiciens etc.) dans des projets communs.

Au niveau de l'enseignement supérieur nous avons des formations doctorales capables

de fournir des enseignements de qualité et de s'appuyer sur une large panoplie de laboratoires reconnus internationalement.

Comme nous avons pu le percevoir le domaine biomédical joue souvent un rôle moteur en imagerie. Le point le plus critique aujourd'hui est certainement la trop rare présence d'équipements destinés à la recherche, et la difficulté de faire fonctionner les quelques plateformes d'imagerie en Sciences de la Vie du fait de manque de crédits de fonctionnements récurrents. Il faudrait introduire une structure semblable à celle qui gère les grands équipements de la physique doté de moyens financiers et en personnel. Celle-ci pourrait s'appuyer sur les travaux du comité RIO (comité interorganisme de Recherche) qui a recensé l'ensemble de ces plateformes.

D'autre part, il n'existe plus en France d'industriels leaders du domaine à l'échelle internationale. Même en microscopie les leaders sont Allemands ou Japonais.

Cet effet se trouve aggravé à l'échelle européenne par les nombreuses délocalisations qui se font vers l'Asie. On ne verra sans doute pas de sociétés multinationales implanter leur centre de recherche en France dans un proche avenir ce qui n'est pas sans poser de problèmes de débouchés pour les jeunes docteurs qui n'iront pas dans le secteur public mais changeront de domaine ou s'expatrieront. Cependant des start-ups de plus en plus nombreuses voient le jour et occupent des « niches » qui sont stratégiquement importantes. Il faut que nos laboratoires soient encouragés à interagir avec ces petites entreprises, à les dynamiser et à en créer de nouvelles.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LISTE DES ACRONYMES

AFM : atomic force microscopy (microscopie à force atomique)

CCD : charge coupled device (système à transfert de charge)

EDP : équation aux dérivées partielles

FRET : Foster Resonance Energy Transfert

INC : image rie non conventionnelle

IRM : imagerie par résonance magnétique

IRMf : imagerie fonctionnelle par résonance magnétique

MEG : magnétoencéphalographie

EEG : électroencéphalographie

OCT : ou OCM optical coherence tomography ou microscopy

TEP (ou PET) : tomographie par émission de Positron (ou photo emission tomography)

SQUID : superconducting quantum interference device

SNOM : scanning optical near field microscopy (microscopie optique en champ proche à balayage)

STM : scanning tunneling microscopy (microscope à effet tunnel)

TEMP : tomographie par Émission Mono Photonique

VLT : Very Large Telescope

ANNEXE 2 : LISTE DES AUTEURS

Jacques Bittoun

Unité de recherche en résonance magnétique médicale U2R2M – (UMR8081), Hôpital Bicêtre, CIERM, 78 rue du général Leclerc, 94275 Le Kremlin Bicêtre cedex
Mél. : jacques.bittoun@u2r2m.u-psud.fr
Mots clés : Imagerie Médicale, IRM

Isabelle Bloch

Laboratoire traitement et communication de l'information – LTCI (UMR5141), École nationale supérieure des télécommunications, 46 rue Barrault 75013 Paris
Mél. : bloch@enst.fr
Mots clés : Traitement d'images

Claude Boccara

Spectroscopie en lumière polarisée (UPR5), École supérieure de physique et de chimie industrielles – ESPCI, Bat. C, 10 rue Vauquelin 75231 Paris cedex 05 UPMC
Mél. : boccara@optique.espci.fr
Mots clés : Optique et images

Pierre Chavel

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique – (UMR8501), Institut d'optique théorique et appliquée, Bât. 503, centre scientifique d'Orsay, 91403 Orsay cedex
Mél. : pierre.chavel@iota.u-psud.fr
Mots clés : Optique et images

Maïté Coppey

Institut Jacques Monod – IJM (UMR7592), Université Denis Diderot (Paris VII), tour 43, 2 place Jussieu 75251 Paris cedex 05
Mél. : coppey@ijm.jussieu.fr
Mots clés : Microscopie et biologie

Daniel Courjon

Laboratoire d'Optique P.M. Duffieux – LOPMD, CNRS, Université de Franche-Comté, UFR Sciences, route de Gray, 25030 Besançon cedex
Mél. : daniel.courjon@univ-fcomte.fr
Mots clés : Optique de champ proche

Claude Fabre

Laboratoire Kastler Brossel – LKB (UMR8552), École normale supérieure, 24 rue Lhomond

75231 Paris cedex 05 ; Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), tour 12, 4 place Jussieu BP 74 75252 Paris cedex 05 UPMC

Mél. : fabre@spectro.jussieu.fr

Mots clés : Imagerie quantique.

Mathias Fink

Laboratoire ondes et acoustique – LOA (UMR7587), École supérieure de physique et de chimie industrielles, 10 rue Vauquelin 75231 Paris cedex 05
Mél. : mathias.fink@espci.fr
Mots clés : Ondes et Acoustiques

Line Garnero

Neurosciences cognitives et imagerie cérébrale – LENA (UPR640), Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) CHU La Salpêtrière, 47 bd. de l'hôpital 75651 Paris cedex 13
Mél. : line.garnero@chups.jussieu.fr
Mots clés : Imagerie médicale,

Fabrice Heitz

Laboratoire des sciences de l'image, de l'informatique et de la télédétection – LSIT (UMR7005), Université Louis Pasteur (Strasbourg I), ENSPS, 5 bd. Sébastien Brant 67400 Illkirch Graffenstaden
Mél. : fabrice.heitz@ensps.u-strasbg.fr
Mots clés : Traitement d'images

Denis Joyeux

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique – LCFIO (UMR8501), Institut d'optique théorique et appliquée, Bât. 503, Centre scientifique d'Orsay 91403 Orsay cedex
Mél. : denis.joyeux@iota.u-psud.fr
Mots clés : Optique des rayons X

Philippe Lanièce

Institut de physique nucléaire d'orsay – IPN (UMR8608), Université Paris Sud (Paris XI), Bât. 100, 91406 Orsay cedex
Mél. : laniece@ipno.in2p3.fr
Mots clés : Physique des particules

Pierre Lena

Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique – LESIA (UMR8109) Observatoire de Paris – section de Meudon, 5 place Jules Janssen 92190 Meudon

Mél. : pierre.lena@obspm.fr
Mots clés : Astronomie, Optique astronomique

Dominique Lesselier

Laboratoire des signaux et systèmes L2S
(UMR8506), École supérieure d'électricité
Plateau de Moulon, 3 rue Joliot Curie
91192 Gif sur Yvette cedex
Mél. : lesselier@lss.supelec.fr
Mots clés : Imagerie microondes, problèmes inverses

Brahim Lounis

Centre de physique moléculaire optique et
hertzienne (CPMOH (UMR5798), Université
des sciences et technologies (Bordeaux I),
Bât. Recherche Physique, 351, Cours de la
Libération 33405 Talence cedex
Mél. : b.lounis@cpmoh.u-bordeaux1.fr
Mots clés : Nanosondes pour la biologie

Philippe Réfrégier

Institut Fresnel Marseille (UMR6133),
École généraliste d'ingénieurs de Marseille,
Domaine universitaire de St-Jérôme,
Avenue Escadrille Normandie Niem,
13397 Marseille cedex 20
Mél. : philippe.refregier@fresnel.fr
philippe.refregier@enspm.u-3mrs.fr
Mots clés : Traitement du signal et des images

ANNEXE 3 : FIGURES

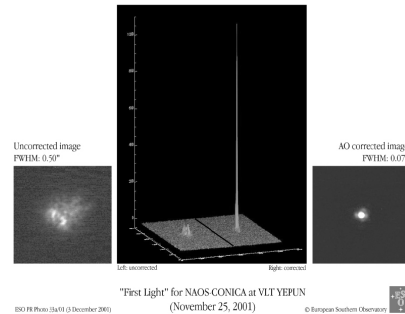


Figure 1 : Astronomie : correction de l'image d'un objet ponctuel par optique adaptative (images supérieures).

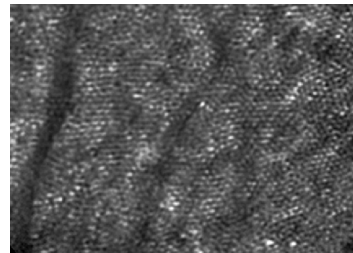


Figure 2 : Application : correction de aberrations de l'œil pour l'observation des récepteurs rétiniens (image inférieure) (UMR8109 CNRS).

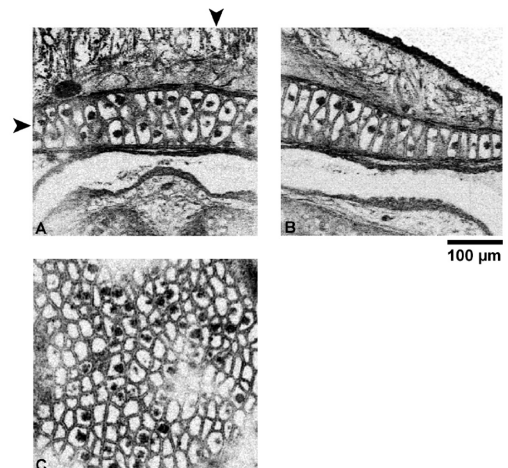


Figure 3 : Coupes obtenues par OCT sur un embryon de grenouille africaine (*Xenopus laevis*). On distingue les structures cellulaires et les noyaux dans la profondeur des tissus (UPR A0005 CNRS).

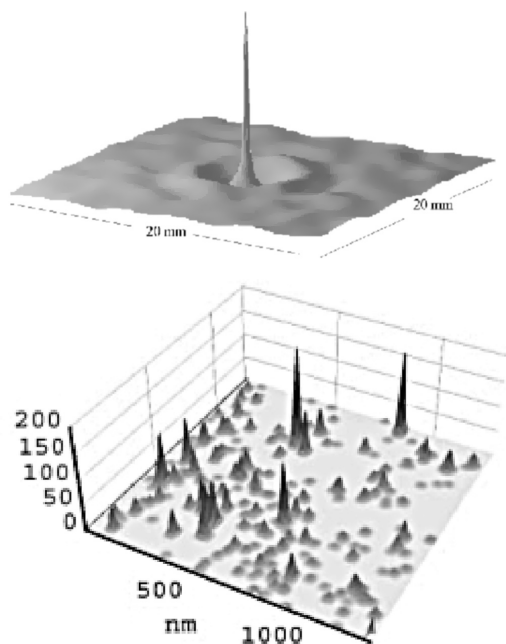


Figure 4 : Champ proche optique et acoustique : sur l'image supérieure on voit la focalisation des ultrasons sur des dimensions de l'ordre du centième de la longueur d'onde acoustique. L'image inférieure représente, dans le domaine optique avec une résolution de 10nm, la distribution du champ électrique sur un réseau de particules d'or au seuil de percolation. (UPR5-UMR 7587 CNRS).

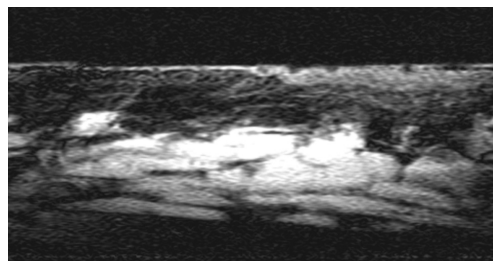


Figure 5 : Tumeur de la peau (carcinome basocellulaire) détectée in vivo par IRM à haute résolution sur le mollet d'un patient. La taille de l'image est de 5 mm (vertical) par 10 mm. La tumeur apparaît comme un épaissement de l'épiderme (en haut à droite). (UMR 8081 CNRS et IGR).

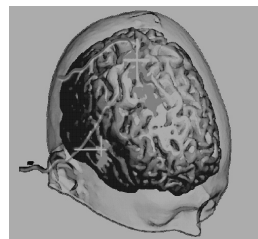


Figure 6 : Image de l'activité électrique du cerveau et décours temporel de ces activations obtenus à partir d'enregistrement de MEG (Magnétoencéphalographie) – UPR 640 CNRS.