

L'IMAGERIE BIOMÉDICALE : définition d'une typologie et proposition d'activités pédagogiques

Pierre Clément

Après quelques réflexions théoriques sur la définition et la typologie des images scientifiques, notamment en fonction des deux pôles figuratif/graphique, ce texte présente les principaux types d'imagerie biomédicale et leurs codes de reconnaissance spécifiques (iconiques et scientifiques). Il est montré que toutes ces imageries sont structurées autour de trois notions

- la transparence/opacité : microscopie optique et électronique, radiographie, scanner X ;
- la réflexion de signaux : œil nu, loupe, endoscopie, échographie ;
- l'émission de signaux : scintigraphie, TEP (tomographie par émission de positons), IRM (imagerie par résonance magnétique), thermographie, EEG et MEG (électro- et magnéto-encéphalographie).

Ces trois notions structurantes peuvent être l'objet de stratégies pédagogiques. D'autres obstacles sont identifiés au cours de cette analyse, notamment le problème de l'articulation entre des images 2D et des structures 3D. Plusieurs activités pédagogiques sont finalement proposées pour une familiarisation précoce des élèves à ces questions, dès l'école primaire ou même maternelle : ombres chinoises, mosaïques, coupes sérieées, et diverses méthodes de visualisation du relief.

l'usage scolaire
croissant de
l'imagerie
biomédicale

De la maternelle à l'université, l'enseignement de la biologie et de la médecine est très visuel. Son iconographie s'est considérablement enrichie et diversifiée durant ces dix dernières années, à la suite des progrès spectaculaires de l'imagerie biomédicale : endoscopie, échographie, thermographie, scanner X, scintigraphie, tomographie par émission de positons (TEP ou, en anglais, PET-Scan), I.R.M. (imagerie par résonance magnétique), cartographie des EEG et MEG (électro- et magnéto-encéphalographie) : autant de nouvelles façons de décrire l'intérieur du corps humain (son anatomie, son fonctionnement, ses pathologies) sans avoir à le disséquer ou à le couper en tranches. Seules les radiographies, dont nous venons de fêter le centenaire (c'est en décembre 1895 que Roentgen réalisa la première radiographie sur la main de sa femme : Pallardy *et al.*, 1989), préfiguraient cette explosion de l'imagerie biomédicale (1).

- (1) "Le terme d'imagerie médicale a été introduit pour définir l'ensemble des nouvelles techniques venues épauler la radiologie dite conventionnelle." (Aubert & Laissy 1995) : il s'agit de toutes les techniques qui permettent de voir les structures vivantes d'un corps humain sans avoir besoin de l'ouvrir, le disséquer ou le couper en

l'objectif de ce texte : rendre ces images moins mystérieuses, pour aider leur usage scolaire

La colorisation de cette imagerie moderne numérisée lui confère une dimension esthétique qui contribue à la rendre fascinante, et explique que les médias en soient friands. Mais ces images restent dans l'ensemble plutôt mystérieuses, même pour les enseignants. Elles risquent dès lors d'être sous-utilisées à l'école, malgré les programmes et instructions officielles. L'objectif premier de ce texte est d'éviter cette sous-utilisation, en montrant que derrière ces images se cachent des types d'approche finalement simples, peu nombreux et susceptibles d'apprentissages redondants depuis le début de l'école primaire, voire depuis la maternelle. L'acquisition précoce de ces notions structurantes devrait faciliter la compréhension ultérieure de l'imagerie biomédicale la plus complexe.

Mais, auparavant, je développerai quelques aspects plus théoriques pour souligner le double ancrage de mes réflexions dans la sémiologie et la didactique des sciences, tout en présentant une typologie des images scientifiques pour situer l'imagerie biomédicale par rapport aux autres images scientifiques.

1. LE CONTEXTE THÉORIQUE

1.1. Qu'est-ce qu'une image ?

une image n'est ni un texte, ni l'objet qu'elle représente

Tout d'abord, qu'est-ce qu'une image ? La réponse n'est pas si aisée. Du côté de la sémiologie, Peirce (1931-1935) ou Morris (1938) la définissent comme un "*signe iconique*" qui aurait des propriétés de ce qu'il dénote. Cependant Umberto Eco (1968), sémioticien lui aussi, dénonce cette tautologie : "*les signes iconiques ne possèdent pas les propriétés de l'objet représenté [...] ils reproduisent certaines conditions de la perception de l'objet mais après les avoir sélectionnées selon des codes de reconnaissance et les avoir notées selon des conventions graphiques.*"

Ces codes de reconnaissances et conventions graphiques ne sont pas ceux du langage écrit : une image n'est pas un texte. Elle est tout de suite perçue dans sa globalité, dans l'ensemble de l'"*énoncé iconique*" (U. Eco, 1968). Certes, dans cet énoncé sont identifiables des signes iconiques, sortes de mots dans un texte ; mais, plus que dans un texte, le sens des signes dépend de celui de l'image.

une image n'induit pas les mêmes actions qu'un objet

Toute image se situe entre deux pôles, le figuratif et le non-figuratif. Mais même les images les plus figuratives (photos ou peintures réalistes) diffèrent fondamentalement de ce qu'elles représentent : elles n'induisent pas les mêmes

tranches. Mais ce travail concerne aussi les images anatomiques, histologiques et cytologiques (y compris la cyto- et l'histo-physiologie) : soit l'ensemble que je nomme, à la suite de Taugourdeau 1981, l'imagerie biomédicale.

actions chez celui qui regarde. Face à un rocher, je peux m'approcher, le toucher, grimper dessus ; face à sa photo, je peux certes regarder à la loupe mais c'est très limité, et les autres actes seront imaginaires, par analogie avec mes expériences antérieures sur des rochers.

Le sens, la signification d'un phénomène, d'un objet ou de leur image viennent des perceptions-actions et interprétations qu'ils enclenchent, et qui dépendent de l'histoire individuelle de celui qui regarde, et de son contexte culturel et social (Clément 1992, Clément *et al.* 1996). L'interprétation d'une image peut ne pas avoir grand chose de commun avec ce qu'espérait son concepteur. Les formateurs et les chercheurs en didactique le savent bien : ce n'est pas parce que l'enseignant a une idée très claire de son schéma, que ce sera aussi clair pour l'élève !

1.2. Qu'est-ce qu'une image scientifique ?

Une image scientifique est un énoncé iconique dont les référents (ce qu'elle cherche à dénoter) sont scientifiques : elle concerne une interprétation scientifique du monde, qui est encodée dans l'image. Mais toute image est susceptible de multiples connotations. Toute image scientifique a un impact autant affectif que cognitif. Par exemple, au festival du film scientifique d'Oullins, un membre du jury s'évanouissait à chaque documentaire médical montrant des visières vivantes par endoscopie ...

pour
comprendre
une image
scientifique, il
faut maîtriser des
codes iconiques
et des codes
scientifiques
précis

Comprendre une image scientifique nécessite une connaissance préalable des codes scientifiques et iconiques qui lui donnent du sens, qui font émerger du signifié à partir de formes qui, sinon, demeurent bien mystérieuses ou sont interprétées à partir d'autres codes (familier, esthétique, psychanalytique...). Et la vulgarisation scientifique favorise souvent ces autres niveaux d'interprétation, partant du principe que, même si le lecteur n'y comprend rien, il aura au moins du plaisir à voir cette image !

Le sens d'une image scientifique dépend de la **pratique individuelle et sociale** non seulement de celui qui la produit, mais aussi de celui qui la regarde. Par exemple, l'ingénieur cherche juste à obtenir des images nettes ; ce qui est pour lui un signifié devient signifiant pour le biologiste qui observe ces images nettes en fonction de sa problématique de recherche : il sélectionne des images preuves, publiables dans des revues scientifiques très spécialisées. Images qui sont parfois choisies sur d'autres critères par les vulgarisateurs ou par les enseignants. Ainsi la même image biomédicale n'a pas le même sens ni la même fonction dans une pratique de recherche fondamentale, de diagnostic médical ou à l'école.

1.3. Une typologie des images scientifiques

qui ?
pour qui ?
pour quoi ?

Plusieurs typologies sont possibles en fonction des objectifs visés. Par exemple, l'analyse peut s'organiser autour des trois questions essentielles suivantes : qui a réalisé cette image ? pour quels destinataires ? pour quelles fonctions ? Elle peut aussi se focaliser surtout sur ce troisième point, en analysant les types d'impacts de l'image sur ses destinataires : affectif et/ou cognitif, plus ou moins heuristique selon les interrogations, actions ou interprétations qu'elle suscite.

La typologie présentée ici est axée sur la question : comment l'image a-t-elle été réalisée, à partir de quels codes scientifiques et iconiques ? Le pré-supposé de cette approche est que le destinataire doit avoir les capacités d'une maîtrise minimale de ces codes pour comprendre l'image.

- **Deux pôles : images graphiques et images figuratives**

les données ou concepts pré-existent aux images graphiques qui les représentent

Les images graphiques mettent en forme des données ou interprétations qui préexistent : équations, résultats expérimentaux, modèles et autres conceptualisations. Les images figuratives, *a contrario*, ont un rapport direct avec les objets ou phénomènes à interpréter ; même si ce rapport implique des appareillages plus ou moins sophistiqués, avec transcodage des signaux les plus divers en signes iconiques.

Le plus simple pour illustrer ce clivage (et ses limites) est de prendre quelques exemples.

les images figuratives sont la source d'informations nouvelles sur ce qu'elles représentent

Des images de biologie moléculaire ou d'immunologie (telles que la structure de la membrane, la synthèse des protéines, les clefs et serrures des antigènes et anticorps) ont été construites par les chercheurs pour formaliser leurs conceptualisations : ce ne sont pas des images figuratives. L'**ADN** schématisé par sa double hélice en est un bon exemple. En revanche, l'image de double hélice d'ADN observée récemment au microscope à effet tunnel est une image figurative (et controversée d'ailleurs) qui confirme enfin la conceptualisation classique en double hélice. Les images de chromatographie du séquençage d'ADN (négatifs photo où chaque bande indique l'emplacement d'une des 4 bases) sont des images figuratives ; mais leur traduction en une longue succession des quatre lettres ATCG n'est plus une image : c'est une information alpha-numérique tout comme les symboles chimiques. La **carte géographique** est un exemple typique d'image graphique, non figurative donc : elle existait avant les photos aériennes ou par satellite qui sont, elles, des images figuratives : il est dans ce cas possible d'établir un continuum entre l'image figurative et non figurative.

- **Les images graphiques**

Elles peuvent être classées en trois grands groupes, selon la nature des données qui ont permis de les construire.

trois catégories
d'images
graphiques,
mettant en
graphes
- soit des
données
empiriques,
- soit des
équations,
- soit des
concepts

a/ Images construites à partir de tableaux de données empiriques : histogrammes, courbes, camemberts, cartographie... ; Bertin (1967) en a donné une analyse sémiologique qui demeure une référence.

b/ Images construites à partir de fonctions mathématiques : graphes correspondant à des équations, univers de la géométrie, ou encore des fractales ; mais aussi toutes les simulations de phénomènes complexes (automates cellulaires, réseaux neuro-mimétiques...).

c/ Images de conceptualisations scientifiques : schémas d'électricité ou d'optique, atome de Bohr ou images de macromolécules, etc. Il ne s'agit donc que d'une partie des schémas tels que Vézin (1984) les a définis. Cette catégorie inclut en revanche les types de dessins/schémas créés par les vulgarisateurs spécifiquement pour leurs publics, et parmi lesquels Jacobi (1987) distingue la métaphore, l'animation, le réalisme-grotesque... ; ainsi qu'une grande partie des schémas ou diagrammes créés pour les manuels scolaires, et à propos desquels une typologie fine reste à construire.

• *Les images figuratives*

deux grands
types d'images
figurent
- soit des
domaines visuels

a/ Codage iconique de signaux visuels, qui peuvent être photographiés, filmés, peints, dessinés ou schématisés (schémas figuratifs dans ce cas) : observations directes ou à travers des instruments d'optique. Ces images restent dans l'univers visuel, mais souvent non familier (le très petit, le très grand, le très rapide ou le très lent, l'infra-rouge, l'ultra-violet, le luminescent, l'habituellement caché vu par endoscopie, etc.).

- soit des
domaines
non visuels
transcodés

b/ Transcodage iconique (2) par transformation de signaux physiques les plus divers en signaux visuels (donc ensuite en photos, films, images numériques ou dessins). Ces images sont toujours très difficiles à comprendre. Certaines visualisent des signaux physiques ; d'autres les localisent, cartographient leur répartition ; d'autres enfin visualisent l'interaction entre des signaux physiques et les structures étudiées.

• *Numérisation des images, et mixage figuratif / graphique*

L'image figurative numérisée s'hybride aisément désormais avec des images graphiques de synthèse. Dans certains films récents, le spectateur n'arrive guère à faire la distinction.

(2) Cette notion de transcodage iconique n'est pas à confondre avec celle de "*médiateur intersémiotique*" que Tardy (1975) utilise, à la suite de Jakobson (1963) pour exprimer que l'image peut être la traduction intersémiotique d'un signe linguistique : idée qui correspond plutôt à la troisième catégorie des images graphiques.

hybridation entre le "vrai" (figuratif) et le "faux" (construction graphique)

L'imagerie médicale est actuellement numérique (à part les radiographies classiques (3) et les endoscopies) mais elle reste figurative. Certes ses images numériques sont "travaillées", par élimination d'artefacts, par colorisation artificielle des niveaux de gris, etc. Mais chacune de ces opérations est scientifiquement justifiée, et le chercheur, le médecin ou le patient peuvent rester confiants par rapport aux informations nouvelles que l'image figure.

Certaines de ces images médicales sont composites. Ainsi les illustrations des cerveaux d'hommes et de femmes publiées récemment dans *Nature* (Shaywitz *et al.* 1995) puis reprises dans la plupart des revues de vulgarisation scientifique, incrustent, sur des coupes tomographiques classiques obtenues en IRM, des pixels colorés qui résument tout un protocole expérimental couronné par des calculs statistiques : l'image graphique est superposée à une image figurative.

2. PRÉSENTATION DES PRINCIPAUX TYPES D'IMAGERIE BIOMÉDICALE, EN LES REGROUPANT AUTOUR DE TROIS NOTIONS STRUCTURANTES

- réflexion
- transparence/
opacité
- émission
des signaux

Ces trois notions structurent déjà notre univers visuel :

- les objets visibles qui nous entourent réfléchissent la lumière jusqu'à nos yeux ;
- mais certains d'entre eux sont vus par transparence, après que la lumière les ait plus ou moins traversés ;
- enfin nous voyons aussi, directement, la lumière émise par des sources lumineuses.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales familles d'imagerie biomédicale, pour montrer que, au delà de leur diversité et de leur apparente complexité, elles sont structurées chacune par l'une de ces trois notions. Une telle présentation synthétique n'est nulle part disponible à ma connaissance ; le lecteur pressé peut directement se reporter à la synthèse du chapitre 3.

2.1. La réflexion des signaux

- **Réflexion de photons du spectre lumineux visible**

Cette imagerie est celle qui pose le moins de problèmes d'interprétation, car elle renvoie à des codes sémiotiques visuels qui nous sont souvent familiers : dessins ou peintures à partir d'observations à l'œil nu, photos ou films avec des grossissements auxquels nous sommes habitués. Les codes

(3) Ce qui n'empêche pas l'usage de systèmes experts pour l'aide au diagnostic à partir de radiographies : Wackenheim 1987.

l'univers familier
des images
anatomiques
peut encore
nous étonner
(dissection,
endoscopie,
microscopie,
ralenti,
accélééré...)

scientifiques n'en sont pas moins spécialisés, surtout quand il s'agit d'images inhabituelles :

- observations *in vivo* à l'intérieur du corps humain, avec une caméra couplée à une fibre optique ;
- arrêts sur images ou ralentis (photos ou films grande vitesse) ;
- exploration de l'univers microscopique enfin (loupe, objectifs macro des appareils de photo ou caméras).

Notons enfin que l'anatomie du corps humain, désormais observable sur des individus vivants grâce à l'imagerie médicale, a été établie par des observations à l'œil nu, après dissections, sections, reconstitutions à partir de tranches anatomiques sériées (par exemple pour le cerveau). Ou encore à partir de préparations raffinées telles que la coloration, voire la solidification, des veines ou des artères (injection de cires colorées ou, plus récemment, de matières plastiques ; Lemire 1993) : cette dernière technique permet d'observer aussi finement, et en 3D, l'irrigation sanguine du cerveau que les méthodes les plus modernes (figure 5) : mais les diagnostics étaient alors *post-mortem* !

• **La microscopie électronique à balayage :
une émission d'électrons qui évoque
un mécanisme de réflexion**

l'univers
anatomique
de la M.E. à
balayage
ne surprend que
par ses forts
grossissements

La microscopie électronique à balayage permet d'observer des structures comme à la loupe, mais avec des grossissements qui peuvent être bien plus importants : de x 50 à x 50 000 (les loupes vont de x 2 à x 800). Les objets observés par le biologiste ont été fixés, déshydratés, et le plus souvent recouverts d'une pellicule métallique (de l'or). Ils sont vus en 3D, avec des ombrages qui nous sont familiers, toujours en noir et blanc (figure 1 ; la colorisation de certaines images publiées dans des revues de vulgarisation est surajoutée). Les codes sémiotiques visuels sont donc ceux de notre vision habituelle, mais cette plongée dans cet univers microscopique normalement "invisible", exige des codes scientifiques spécialisés.

Au grossissement près (et à l'absence de mouvements et de couleurs), ces images ressemblent donc à des photos habituelles (figure 1). Mais elles en diffèrent fondamentalement.

- Ce ne sont pas des photons lumineux qui arrivent sur l'objet observé, puis qui impressionnent le négatif photographique : ce sont des électrons, qui se déplacent dans le vide de la colonne du microscope électronique.

- En absence de revêtement métallique sur l'objet observé, il y a bien un phénomène de réflexion des électrons : une partie d'entre eux rebondit sur la surface de l'objet. Mais dans le cas le plus fréquent où les objets sont métallisés, il y a production d'électrons secondaires qui sont arrachés à la couche de métal, et qui donnent un signal 3 à 4 fois plus important pour la formation de l'image : tout se passe à cet

égard comme s'il y avait réflexion avec amplification, mais il y a en fait émission d'électrons.

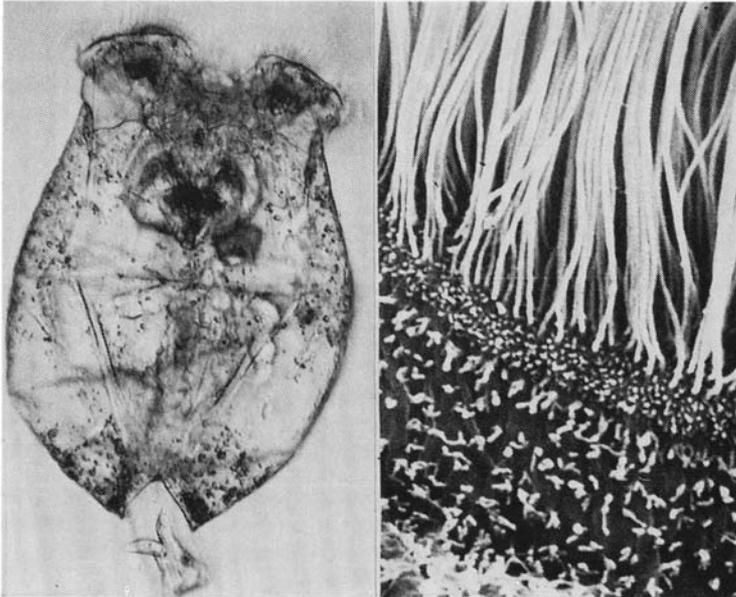


Figure 1. Photo de gauche : Microscopie optique, G x 400

Un rotifère (*Brachionus plicatilis*) vu par transparence. Ces animaux planctoniques portent à l'avant une double couronne de cils qui donnent une impression de roue quand on les voit battre au microscope (d'où le nom de rotifère : qui porte une roue). Le tégument de ces animaux est transparent, et il est possible de voir au microscope tous leurs organes internes : sur cette photo, la mise au point (du microscope et de l'appareil de photo) a été faite sur la partie dorsale de l'animal. (Photo P. Clément)

Photo de droite : Microscopie électronique à balayage, G x 4 000

Les cils antérieurs d'un rotifère sont nettement visibles. La surface de l'animal a été métallisée (or vaporisé) ; son tégument et ses cils ne sont pas transparents ici : c'est leur surface qui est observée, montrant que le tégument porte de très petites villosités. (Photo P. Clément)

• **L'échographie (la réflexion d'ultrasons)**

L'échographie est la technique d'imagerie médicale qui est de loin la plus répandue (4), mais ses images sont souvent difficiles à comprendre. Les premiers échographes datent de 1972. Le principe (voir par exemple Devey & Wells 1983, Weill 1981, Morucci 1992) est de détecter la réflexion d'ultrasons sur des structures vivantes pour obtenir l'image d'une coupe tomographique globalement perpendiculaire à

les ultrasons sont réfléchis comme un écho

(4) Il y a actuellement en France plus de 10 000 échographes en fonctionnement, contre 530 scanners X, 130 appareils d'I.R.M., et 3 sites pour la T.E.P. (qui doit être couplée à la production de radio-isotopes par un cyclotron).

la surface de la peau. Les ultrasons sont émis sous forme d'un pinceau étroit qui se réfléchit à l'interface entre deux structures différentes, comme la réflexion d'un écho contre ces surfaces. L'appareil émet un train d'ultrasons puis enregistre les ultrasons réfléchis (les échos), en les transformant en signaux électriques. La durée entre l'émission et le retour est proportionnelle à la distance parcourue, et permet de localiser les interfaces tissulaires échogènes le long du pinceau d'ultrasons. Le déplacement du pinceau d'ultrasons dans un plan est à l'origine, ligne par ligne, de l'image qui apparaît sur l'écran.

Les liquides sont facilement traversés et ne donnent pas d'écho, tandis que les organes en donnent plus ou moins selon leur constitution et leur organisation ; l'air et le calcium (donc notamment les os) arrêtent les ultrasons : le crâne ne peut donc plus être exploré ainsi à partir du moment où la fontanelle est fermée.

la durée entre l'émission et le retour de l'écho permet de construire l'image d'une coupe tomographique

Depuis une quinzaine d'années, l'image échographique est numérisée : les échos ultrasonores, transcodés en signaux électriques, sont amplifiés et analysés avant de donner les pixels numérisés de cette ligne. L'image qui se construit ligne par ligne est elle-même analysée et améliorée en temps réel. L'effet Doppler permet d'identifier (en couleur sur l'écran) les vaisseaux sanguins. Il devient même possible d'extraire les contours d'une structure (un fœtus par exemple) et d'en reconstituer des images 3D (Morucci, 1992).

Les codes iconiques de l'échographie ne sont pas simples à maîtriser : il faut pour cela une bonne connaissance anatomique préalable des structures observées et de leurs pathologies possibles, conjuguée à une bonne connaissance des mécanismes de l'échographie pour distinguer, dans les échos observés, ce qui est artéfactuel ou significatif.

2.2. Opacité et transparence

Dès sa définition : "ce qui paraît à travers", la transparence est relative. Car si des rayons lumineux traversent totalement un objet, il devient non visible. L'opacité totale ne crée pas plus d'information que la transparence totale. Tout se joue dans des degrés d'opacité/transparence.

Cette notion simple doit être mobilisée pour comprendre un nombre important d'images biologiques ou médicales : microscopie optique (lumière visible), microscopie électronique à transmission (électrons), radiologie (rayons X).

• La microscopie optique

une coupe histologique vue au microscope a une épaisseur, un volume donc

Elle est totalement basée sur cette notion de transparence/opacité par rapport à l'éclairage qui traverse ce qui est observé avant de traverser l'objectif puis l'oculaire du microscope.

son image
superpose toutes
les structures qui
ont arrêté les
rayons lumineux :
comme une
ombre chinoise

Dès ses premières observations sur son prototype de microscope, Leeuwenhoek dessina les micro-organismes présents dans une goutte d'eau, partiellement transparents aux rayons lumineux (figure 1). L'épiderme d'oignon est un autre exemple que connaissent la plupart des élèves, ou encore les cellules desquamantes de notre épiderme buccal.

Mais la plupart des structures vivantes sont trop épaisses et opaques pour être observées ainsi. La solution est la coupe histologique, qui doit être colorée avant d'être observée. Elle a une épaisseur (1 à 2 μm pour les coupes semi-fines, 5 à 10 μm , parfois plus, pour les coupes habituelles après inclusion à la paraffine). Aux faibles grossissements, c'est la superposition de toutes les structures de l'épaisseur de la coupe qui est observée. Aux forts grossissements, c'est l'optique de l'objectif du microscope qui délimite la profondeur de champ observée, et l'observateur explore l'épaisseur de la coupe grâce à la vis micrométrique.

• La microscopie électronique à transmission

une coupe vue
en M.E. à
transmission
à une épaisseur

Ce sont ici des faisceaux d'électrons qui traversent l'objet à observer. Celui-ci doit donc être très fin (l'épaisseur des coupes observées en M.E. à transmission est de 50 à 100 nm), ce qui nécessite des techniques d'inclusion et de microtomie appropriées, sauf cas exceptionnels de structures directement observables car très fines (exemple classique d'un filament d'ADN). Les structures, trop transparentes aux électrons, sont contrastées avec des métaux lourds. Toutes les images de microscopie électronique sont en noir et blanc (figure 2), avec divers niveaux de gris selon les degrés d'opacité aux électrons (les couleurs dans des documents de vulgarisation sont là pour faire joli, mais n'aident guère l'interprétation !).

Figure 2. Commentaire

Dans la **photo c**, le plan de coupe est parfaitement perpendiculaire aux cils, comme l'illustre le schéma de la figure 3. Les structures du cil sont très nettes (membrane cellulaire, 9 doublets périphériques et 2 tubules centraux, structures intermédiaires caractéristiques des kinocils). Les deux traits parallèles superposés à une des coupes transversales de cil indiquent l'épaisseur approximative de la coupe axiale de ces cils (photo a).

Sur la **photo a** il n'est pas possible d'identifier la nature tubulaire des doublets présents dans l'épaisseur de la coupe (voir schéma de la figure 3). La flèche (en haut à gauche) indique une zone où, suite à la courbure du cil par rapport au plan de coupe, c'est un autre doublet périphérique qui devient visible ; au même niveau, la membrane cellulaire du cil n'est plus coupée orthogonalement, et apparaît donc comme une zone grise (comme dans le schéma de la figure 3). La base des cils s'insère sur des racines ciliaires (R) juxtaposées à des mitochondries (mi) et à des éléments du réticulum endoplasmique qui, en bas à droite de la photo, paraissent superposés à une racine ciliaire : ce que l'on comprend aisément quand on imagine l'épaisseur de la coupe. Cu = fine cuticule.

La **photo b** est une image de *cryofracture* des mêmes cils : la cassure passe à l'intérieur même de la membrane cellulaire des deux cils, montrant qu'elle contient des particules intramembranaires à deux niveaux : là où le cil est en contact avec la cuticule (flèches noires : ce niveau correspond au chiffre 1 sur la photo a) ; et là où les microtubules sont en contact avec la membrane (larges flèches creuses ; chiffre 2 sur la photo a).

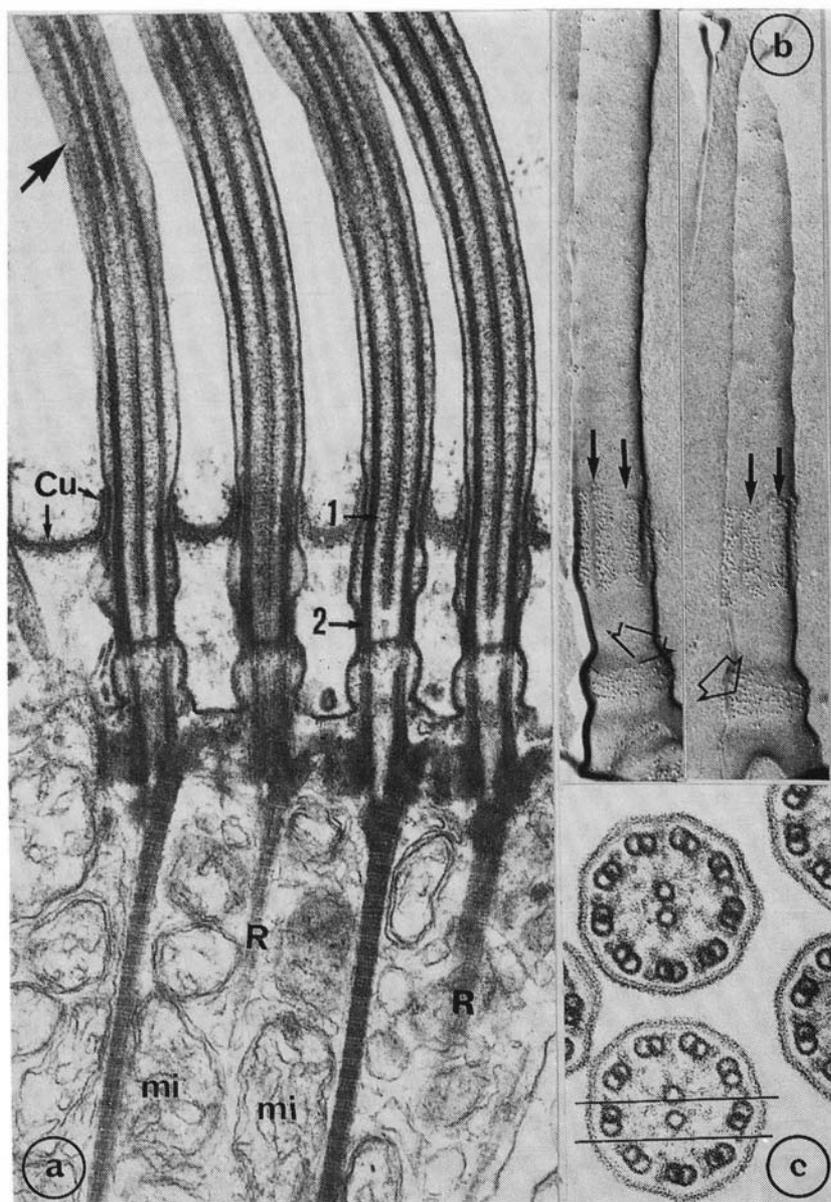


Figure 2. Microscopie électronique à transmission :
a & b - G x 40 000 ; c - G x 100 000

(Photos P. Clément). Détail des cils présentés dans la figure 1.

son image superpose toutes les structures qui ont arrêté les électrons, comme une ombre chinoise

Comme pour les coupes de microscopie optique, celles de microscopie électronique ont une épaisseur (figures 2 & 3). Ainsi une membrane cellulaire n'est observée avec netteté que si son plan est orthogonal à celui de la coupe : sa structure tri-laminaire n'est visible au fort grossissement que dans ces cas favorables. Dès que cette membrane est oblique par rapport au plan de coupe, elle apparaît comme une surface grise ; quand elle est parallèle au plan de coupe, son image disparaît sur l'électro-micrographie, alors qu'elle est bien présente dans la coupe observée (figures 2 & 3).

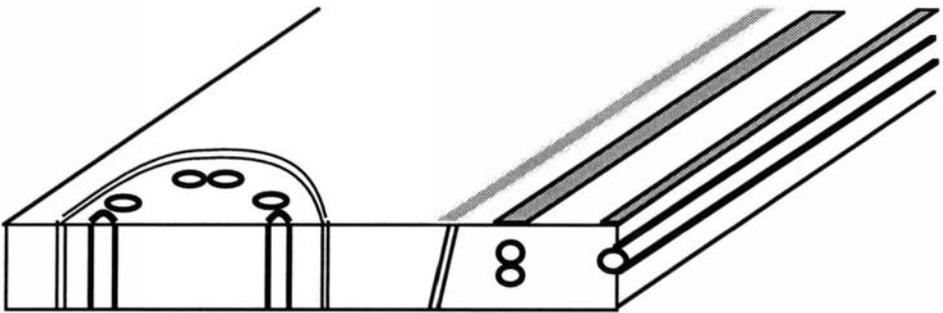


Figure 3. Portion de coupe observée en microscopie électronique à transmission

À gauche, coupe transversale d'une portion de cil (voir figure 2.c) : les doublets sont très nets sur la partie supérieure de la coupe, qui visualise ce que l'on observe au microscope ; la membrane du cil est également très nette, avec son aspect trilaminaire classique (comme dans la figure 2.c).

À droite, coupe axiale d'une portion du même type de cil : le tubule central, comme celui du doublet périphérique, n'est visible que comme une fine bandelette grise où la structure cylindrique du tubule n'est plus reconnaissable. La membrane cytoplasmique du cil n'est pas parfaitement perpendiculaire au plan de coupe : elle apparaît alors comme une bande grise qui ne permet pas d'observer sa structure trilaminaire (comme dans le haut à gauche de la photo de la figure 2.a).

• **Cryofracture et microscopie électronique à transmission**

Le fragment d'organe à observer est congelé, puis cassé : la fracture intéresse bien sûr les volumes intracellulaires ou intercellulaires, mais sa particularité intéressante est de scinder en deux lames les membranes cellulaires, et de permettre alors d'observer leur surface interne (celle qui borde le cytoplasme), ou externe (celle qui borde l'extérieur de la cellule) : elles sont plus ou moins garnies de petites bosses (ou creux) correspondant aux protéines intra-membranaires (figure 2.b).

La surface cassée est métallisée, comme pour la microscopie électronique à balayage. Mais elle est ensuite débarrassée de tout ce qui était structure vivante (avec de l'eau de Javel) et seul le fantôme métallisé superficiel est observé, par transparence en microscopie électronique à transmission, après avoir été "ombré". L'ombrage s'effectue par dépôt orienté d'un métal opaque aux électrons, qui se dépose sur un côté des bosses ou des creux. Les images ressemblent à des paysages lunaires (figure 2.b).

la surface de la structure cassée est ombrée pour rendre apparent son relief

• **Les radiographies**

La première radiographie obtenue il y a un siècle par Roentgen (1895 : la fameuse main de Mme Roentgen) eut un succès très rapide qui dépassa largement le monde scientifique (5). Il était enfin possible de voir l'intérieur du corps humain vivant sans avoir besoin d'opérer.

Les médecins travaillent sur le négatif même des radiographies, en les observant par transparence. Il y a donc une double utilisation de la transparence, où la première seule comprend un transcodage iconique : l'impression de la plaque photo par les rayons X après qu'ils aient plus ou moins traversé les parties du corps observées (selon que ces structures sont plus ou moins transparentes/opaques aux rayons X).

Est surtout opaque le squelette osseux (mais pas le cartilage) ; d'autres organes peuvent aussi être observés, avec un minimum d'habitude, les poumons par exemple. Les cavités deviennent visibles après injection de produits opaques aux rayons X : angiographies, urographies, coronarographies, ...

Les structures opaques aux rayons X sont projetées sur le plan de la radiographie, en étant superposées. L'art du radiologue est de trouver les bons angles avec les bonnes positions du corps, et de prendre plusieurs clichés jusqu'à pouvoir interpréter en 3D les structures observées.

• **Le scanner X**

Le scanner X, ou tomodynamomètre, a été découvert en 1972 par Hounsfield qui obtint pour cela le prix Nobel de Médecine en 1979 (6). Il permet d'observer sur des individus vivants l'anatomie de tranches successives de l'organe observé, le cerveau par exemple : ce sont des coupes tomographiques sériées, perpendiculaires à l'axe tête-pieds du sujet (figure 4).

la radiographie
superpose toutes
les structures qui
ont arrêté
les rayons X

-
- (5) Les années suivantes, dans les foires populaires, à côté de la projection des premiers films Lumière nés aussi en 1895, l'autre attraction à succès était de voir le squelette de sa main ou de son pied par radiographie. Et les mystérieux rayons X furent à l'origine de mille fantasmes de transparence : les dessins du début du siècle montrent le voleur observant les écus dans la poche du bourgeois avant de passer à l'acte, le voisin indiscret observant sa voisine à travers la cloison, etc. (Pallardy *et al.* 1989).
- (6) Selon Barat & Laurent (1992), dates confirmées par d'autres sources. À noter qu'Aubert & Laissy (1995, page 36) donnent d'autres dates : "*fin des années 1960*" et, pour le prix Nobel, "*en 1969*". Le principe de la tomographie, découvert en 1930, repose sur l'application du théorème de Thalès : en faisant subir une rotation simultanée au tube qui émet les rayons X et au film impressionné par les rayons non absorbés par les structures traversées, seules les structures situées dans le plan de rotation apparaissent nettes, les autres étant floues.

le scanner X
donne des
images
de coupes
tomographiques
où sont visibles
les structures
opaques aux
rayons X...

Dans le scanner, la source de rayons X tourne en balayant un plan de coupe de l'organe observé (une tête humaine par exemple) ; les rayons X arrivent sur plus de mille récepteurs (qui tournent en même temps) ; les signaux détectés varient en fonction de l'opacité/transparence aux rayons X des structures traversées : ils sont transcodés en signaux électriques, puis numérisés et analysés. Des algorithmes appropriés permettent ainsi à l'ordinateur de calculer la "densité" (i.e. le degré de transparence/opacité aux rayons X) de chaque pixel (voxel en fait puisqu'il s'agit d'une coupe tomographique qui a une épaisseur : voir figure 5) dans le "plan" de coupe exploré. Le pouvoir séparateur optimal du scanner X est actuellement très bon, de l'ordre de 0,3 mm. Les radiologues ont pris l'habitude de tirer sur négatif photographique les images scanner. La colorisation n'est qu'une pratique de vulgarisation, à des fins esthétiques.

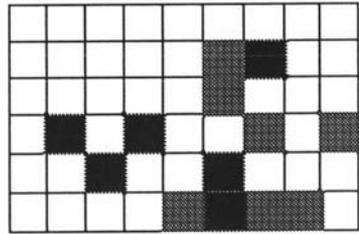
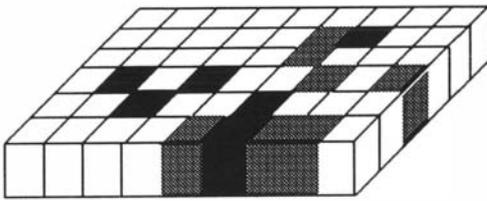


Figure 5. Portion de coupe tomographique

À gauche, schéma tridimensionnel où chaque cube élémentaire est un voxel (en fait ce ne sont pas des cubes car l'épaisseur de la coupe est supérieure à la longueur des côtés des carrés du damier). À chaque voxel correspond un niveau de gris (pour simplifier, ce schéma ne présente que trois niveaux de gris : blanc, gris et noir ; il y en a en général 256, parfois plus).

À droite, la surface numérisée, avec les pixels correspondants.

... ou encore
des images 3D

Dernier-né des scanner X, le morphomètre, dont le prototype a été conçu à Grenoble et dont n'existent encore que quelques exemplaires en France (Nantes et Lyon), permet d'obtenir directement, à partir d'algorithmes spécifiques, des images 3D très précises des structures opaques aux rayons X (figure 6).

Ci-contre : Figure 4. Scanner X - Coupes tomographiques sériées du haut de la tête

(Les négatifs correspondant à ces photos m'ont été gracieusement transmis par l'Hôpital Neuro-Cardio de Lyon, Service de Radiologie.)

En bas à gauche, une radiographie de la tête vue de profil permet de situer les plans des diverses coupes tomographiques effectuées lors de cet examen clinique. Elles sont ici assez espacées l'une de l'autre, et seules les coupes supérieures sont ici reproduites. Celles qui sont situées vers le sommet de la tête sont des coupes tangentielles dans les circonvolutions corticales, tandis que les ventricules apparaissent plus bas. Les échelles de niveaux de gris situées entre les coupes tomographiques, précisent le fenêtrage choisi pour chaque coupe, du blanc au noir.

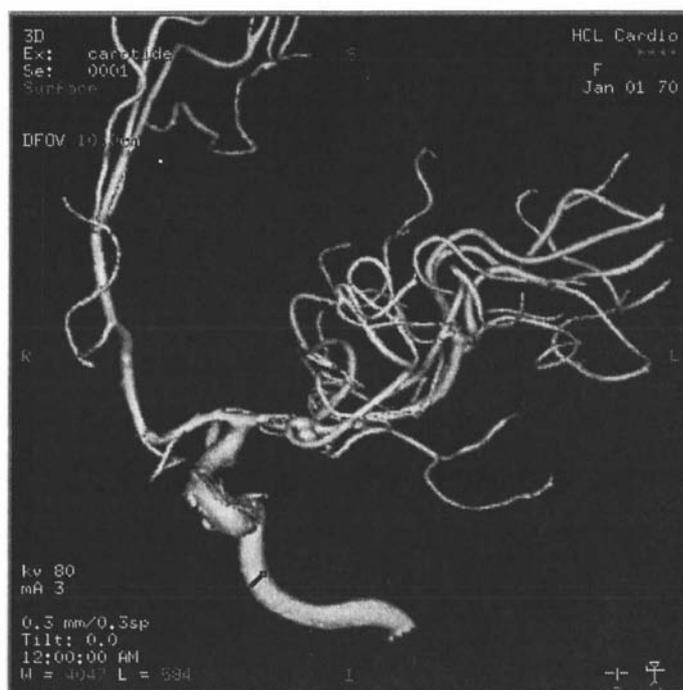


Figure 6. Scanner X - 3D = Morphomètre : angiographie 3D

(Document CREATIS, URA-CNRS 1216 et Hôpital Neuro-Cardiologique de Lyon.)

Un produit de contraste à base d'iode, opaque aux rayons X, a été injecté au patient dont la carotide et ses ramifications cérébrales sont ici présentées. L'angiographie classique aboutit à une image numérique 2D par soustraction des structures avant et après l'injection du produit opaque. Le protocole est ici le même, mais l'acquisition de l'image est d'emblée 3D, selon des algorithmes spécifiques au morphomètre. L'image numérique obtenue peut être observée sous n'importe quel angle, ce qui permet des localisations très précises. La vue choisie ici permet de voir un petit anévrisme (deux petites boules vers la base de la branche droite de la carotide).

2.3. L'émission de signaux

L'émission de signaux a d'abord été utilisée comme un complément des techniques précédentes. Par exemple, quand un animal absorbe un produit radioactif, il est ensuite possible de localiser ce produit sur des coupes anatomiques ou microscopiques : ce qui renseigne sur le métabolisme de l'organisme, des organes, ou des cellules (selon le niveau d'observation). Le même principe est à la base de toutes les familles d'imagerie médicale qui relèvent de la médecine nucléaire.

Mais d'autres familles d'imagerie fonctionnent sur le principe de la localisation de l'émission de signaux émis par l'organisme : soit pour les cartographier (EEG-MEG, thermographie), soit pour des études anatomiques fines, et depuis peu également physiologiques (IRM).

des images
fonctionnelles sur
le métabolisme
normal ou
pathologique
des organes

• **La médecine nucléaire : scintigraphie, TEP (tomographie par émission de positons)**

une scintigraphie plane superpose toutes les structures du corps qui ont émis un signal

Dès la découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934, la médecine nucléaire est née en utilisant comme traceurs des isotopes radioactifs d'éléments impliqués dans des processus du métabolisme humain, normal ou pathologique. La première image scintigraphique fut prise au milieu du siècle, visualisant de façon bien grossière une thyroïde après injection chez le patient d'iode 131 radioactif.

La scintigraphie reçut une impulsion décisive quelques années après, avec la fabrication par Anger (à Berkeley) de la première caméra à scintillations (γ -caméra) : les radioéléments injectés au malade et fixés ensuite sur des zones précises en fonction de sa pathologie devenaient localisables sur une image par la détection des rayonnements qu'ils émettent (rayonnements de très courte longueur d'onde : X spéciaux, et surtout γ).

en tomoscintigraphie, les structures qui ont émis un signal sont localisées sur une coupe tomographique

La scintigraphie plane balayait tout le corps, impressionnant ligne par ligne une pellicule photo : y étaient visualisées par exemple toutes les zones touchées par un cancer osseux sur un corps entier.

La tomoscintigraphie permet désormais d'obtenir des images fonctionnelles sur des coupes tomographiques de l'organe observé : l'image vient des émissions de rayonnements γ à partir des radio-isotopes, qui sont d'autant plus abondants que la zone a été métaboliquement active durant le temps qui sépare l'injection (ou parfois l'inhalation) du radio-isotope et l'observation : il s'agit donc d'une image fonctionnelle.

Ces images sont fréquentes dans les manuels scolaires du secondaire, notamment pour y illustrer des localisations cérébrales. Elles sont colorisées dès le départ, et ne peuvent donc pas être reproduites dans le présent article.

La plupart des équipements hospitaliers importants possèdent actuellement un équipement de tomoscintigraphie. Les observations portent sur tous les organes (cœur, foie, poumons, reins, cerveau...) pour y détecter des anomalies fonctionnelles, avec malheureusement une résolution spatiale qui reste assez médiocre (pouvoir séparateur optimal de 7 à 12 mm.).

Les coupes tomographiques sériées permettent d'obtenir des images 3D.

la T.E.P. localise aussi l'émission de signaux sur une coupe tomographique...

La tomographie d'émission de positons (T.E.P.) est la plus récente et la plus performante des techniques d'imagerie de la médecine nucléaire. Elle est basée sur la détection des rayonnements γ émis lors de l'annihilation d'un positon (7) par un électron. Les positons sont émis par des radio-isotopes particuliers qui marquent des molécules biologiques

(7) On disait initialement "positrons", mais l'Académie française a tranché pour "positons"

...mais avec
beaucoup plus
de précision

injectées aux personnes observées. Ces radio-éléments ont une durée de vie très courte, et doivent être fabriqués par un cyclotron à proximité de l'appareillage de T.E.P., ce qui limite fortement le nombre de sites fonctionnels en France : il n'y en a que trois actuellement (et environ une quarantaine dans le monde : Ter-Pogossian *et al.* 1983). Cette méthode est extrêmement sensible : des perturbations métaboliques fines peuvent être détectées, ou encore des dynamiques fonctionnelles, avec des performances irremplaçables. La construction de l'image numérique d'une coupe tomographique TEP fait appel à des algorithmes mathématiques voisins de ceux du scanner (8).

Les chercheurs travaillent sur des images colorisées (malheureusement non reproductibles ici), chaque couleur étant associée à un niveau d'intensité des rayonnements γ émis par les radio-isotopes injectés. Ils disposent de coupes sériées de l'organe étudié. L'acquisition d'images 3D est désormais possible, selon un principe identique à celui utilisé par le morphomètre (voir plus haut).

• **Cartographie de la distribution d'un indice physique sur une surface extérieure**

la thermographie
n'est plus utilisée
en imagerie
médicale

La thermographie, née en 1950 (Taugourdeau 1981), n'est plus utilisée actuellement pour des recherches ou diagnostics biomédicaux, mais elle est citée ici pour mémoire car certaines de ses images, très esthétiques, sont encore présentes dans des manuels scolaires ou dans des documents de vulgarisation. Elle établit la carte de la température à la surface du corps. Elle a par exemple pu être utilisée pour identifier des tumeurs cancéreuses (notamment du sein), mais les autres techniques d'imagerie médicale sont aujourd'hui nettement plus performantes pour cela.

La thermographie est en revanche très utilisée sur les images aériennes, prises à partir d'un avion ou d'un satellite.

Les champs électromagnétiques émis par le cerveau sont couramment cartographiés par les chercheurs à partir des informations fournies par des capteurs répartis à la surface du crâne (**E.E.G.**, **M.E.G.** = électro- et magnéto- encéphalographie). Dès 1929, Hans Berger a enregistré le premier encéphalogramme, c'est-à-dire la variation au cours du temps du potentiel électrique mesurable à partir d'un capteur placé sur le cuir chevelu (Vigreux 1992). Pour l'E.E.G., 16 à 32 électrodes de contact (dans la pratique courante ; jusqu'à 128 dans certains dispositifs récents) sont réparties

(8) Les détecteurs du rayonnement γ sont situés en couronne, de façon à capter les photons γ émis dans deux directions diamétralement opposées lors de chaque annihilation d'un positon par un électron. La répartition spatiale des radio-isotopes peut ainsi être calculée pour chaque coupe tomographique (Mazière 1987, Ter-Pogossian *et al.* 1983). La résolution spatiale est actuellement de 4 à 8 mm (4 mm étant le maximum de précision des gamma-caméras).

les signaux électriques ou magnétiques émis par les neurones permettent de localiser les zones du cerveau actives lors de tâches précises

sur la surface du scalp, et y enregistrent en temps réel la distribution du potentiel électrique. Le protocole est identique pour la M.E.G. Ces distributions peuvent être représentées par une succession de cartes, colorisées selon des codes spécifiques, témoignant de l'évolution de l'activité cérébrale lors de l'exécution de tâches précises. Ces cartes résultent à présent d'un traitement mathématique des signaux émis, de façon à visualiser leur énergie en fonction de leur fréquence. L'analyse des signaux émis permet aussi de localiser en 3D avec une précision croissante les sources de signaux électromagnétiques dans le cerveau : cela nécessite l'utilisation de modèles (calcul des distributions possibles, et localisation par minimisation des différences avec ce qui est observé) utilisant conjointement les données électriques ou magnétiques et des données anatomiques 3D sur le même cerveau, obtenues par I.R.M. (9). L'image I.R.M. est plus précise (voir tableau 1). L'objectif, ici prioritaire, d'une plus grande précision temporelle (nombre d'images successives par seconde) nécessite de limiter la précision spatiale des E.E.G. et M.E.G. (nombre de capteurs).

• **L'I.R.M. (l'imagerie par résonance magnétique)**

l'IRM donne les images anatomiques les plus précises de coupes tomographiques

L'année 1995 correspond au cinquantenaire de la découverte de la R.M.N. (résonance magnétique nucléaire) par F. Bloch et E.M. Purcell, qui en eurent le prix Nobel de chimie en 1947. Mais l'application à l'I.R.M. (imagerie par résonance magnétique) attendit encore un quart de siècle. Depuis, elle ne cesse de se développer. Elle complète et même remplace avantageusement dans bien des cas, le scanner X pour ce qui est anatomique (pour une comparaison de leurs performances respectives, cf. Barat & Laurent, 1992, ou Aubert & Laissy, 1995). Depuis quelques années, l'IRM fonctionnelle devient très prometteuse.

L'appareil à IRM est plus imposant encore qu'un scanner X. Le patient est placé dans un champ magnétique très intense et orienté, dans l'axe d'un grand aimant principal cylindrique, doublé à l'intérieur de bobines concentriques (de gradient, d'émission, et de réception). Aucune toxicité d'un tel champ magnétique sur le corps humain n'a été remarquée à ce jour (sauf bien sûr s'il possède un stimulateur cardiaque (10).

Le principe de l'IRM est le suivant (11) : les protons des noyaux des atomes (principalement d'hydrogène, l'eau constituant 70 % du corps humain) peuvent être assimilés à

-
- (9) Pr. Pernier, U.280 de l'INSERM, Lyon : communication personnelle ; cf. aussi le numéro spécial du "Courrier du C.N.R.S.", 1992, sur les sciences cognitives.
- (10) L'inconvénient principal semble être le bruit de l'appareil, qui conduit souvent à boucher les oreilles du patient durant la demi-heure d'observation.
- (11) Pour plus de détails sur l'IRM, voir par exemple Pykett 1983, ou Aubert & Laissy 1995 (pages 66-72).

l'IRM localise les signaux (ondes radio FM) émis, après résonance magnétique, par les ions hydrogène de l'eau du corps

images d'IRM : coupes tomographiques et 3D

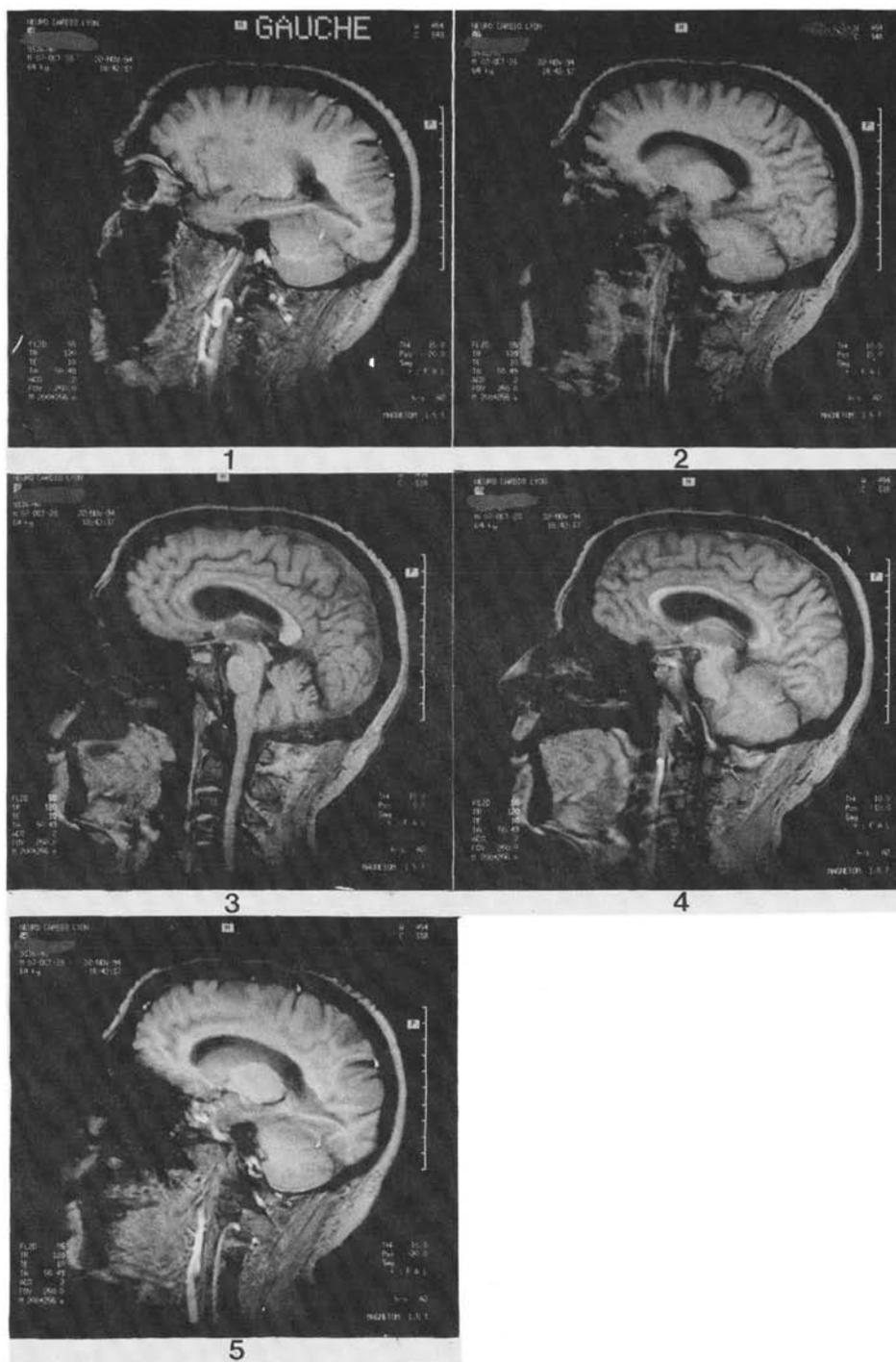
des vecteurs (appelés "dipôles magnétiques" ou "moments magnétiques nucléaires" ou "spins") d'orientation initialement aléatoire ; ces vecteurs deviennent parallèles à la direction du champ magnétique très puissant dans lequel ils sont placés. Une onde radio précise, et orthogonale au champ magnétique, fait alors entrer les protons en résonance, c'est-à-dire modifie l'orientation des vecteurs (dès lors, ils ne sont plus parallèles à l'axe du champ magnétique intense). Lorsque cette onde n'est plus émise, les dipôles retrouvent leur orientation initiale en émettant un petit signal (qui est une onde radio). L'ensemble des signaux émis est à l'origine d'une image qui différencie assez finement les structures (en fonction de leur teneur relative en hydrogène). Contrairement au scanner X, l'orientation des coupes tomographiques est libre : l'observateur peut acquérir deux ou trois séries de coupes du même cerveau, chacune ayant une orientation spatiale choisie (figure 7). Les reconstitutions 3D sont effectuées à partir de ces séries de coupes (figure 8).

Comme pour le scanner X, les médecins radiologues ont conservé l'habitude de travailler sur des tirages négatifs où sont juxtaposées les "coupes" sériées (figure 7), pour les observer par transparence comme des radiographies classiques. Seules les images diffusées auprès du grand public sont colorisées (revues scientifiques, mais aussi manuels scolaires).

**Ci-contre : Figure 7. I.R.M. (Imagerie par résonance magnétique) :
coupes tomographiques sériées de la tête**

(Les négatifs correspondant à ces photos m'ont été gracieusement transmis par l'Hôpital Neuro-Cardio de Lyon, Service de Radiologie.)

L'image classiquement reproduite dans tous les manuels scolaires de classe de Troisième, est à peu près intermédiaire entre la troisième et la quatrième photo de la série présentée ici, montrant une coupe axiale du bulbe rachidien et de la moelle épinière (photo 3) et une coupe axiale du nez (photo 4). La présentation simultanée de coupes sériées permet de comprendre que chacune d'elles a une épaisseur. Les images IRM sont assez précises sur le plan anatomique ; il est par exemple possible de distinguer la substance blanche et la substance grise du cortex cérébral. La photo 1 permet de voir les muscles oculaires de l'œil gauche.



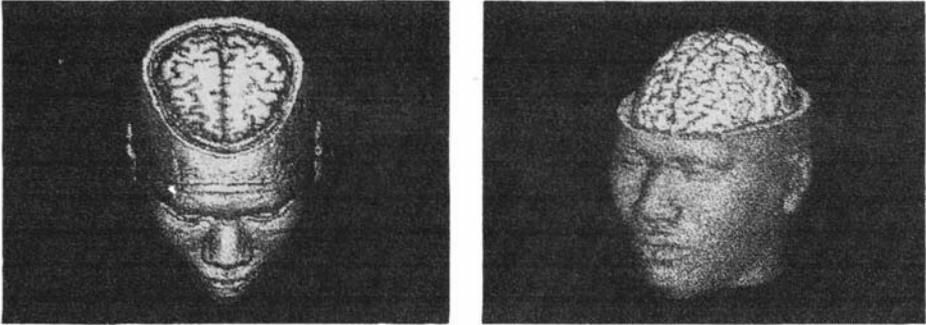


Figure 8. IRM-3D : reconstitution 3D d'une tête

Il s'agit de la tête du violoniste Vinh Pham, dans le film "Un violon dans la tête" de Edelman et Privat (images d'après Edelman 1994).

Il est possible de reconstituer des images 3D aussi précises que celles-ci à partir d'un grand nombre de coupes tomographiques sériées. Le plan de ces coupes est ici orthogonal à celui des images de la figure 7.

l'IRM fonctionnelle commence à donner des images du fonctionnement normal ou pathologique des organes

L'IRM fonctionnelle ne se développe que depuis peu de temps, à la suite des progrès de la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (qui permet d'identifier des substances précises sur des structures vivantes : Shulman 1983). Il devient actuellement possible de cartographier les zones cérébrales impliquées dans certaines tâches d'activation neuro-sensorielles (par mesure de l'augmentation du débit sanguin). Cette technique récente ouvre de nouvelles voies pour l'imagerie fonctionnelle jusqu'ici explorée par les diverses méthodes de la médecine nucléaire (cf. plus haut), mais elle ne fonctionne pour l'instant qu'expérimentalement dans des laboratoires de recherche. L'image fonctionnelle, paramétrée, est incrustée *in fine* sur une image IRM classique (voir par exemple Shaywitz *et al.*, 1995). L'objectif étant d'observer une dynamique fonctionnelle avec une résolution temporelle optimale, la résolution spatiale reste actuellement assez grossière (3 à 10 mm.).

3. BILAN (TABLEAUX 1 & 2) ET HYPOTHÈSES SUR LES OBSTACLES

3.1. Bilan du chapitre 2.

Le tableau 1 synthétise certaines des informations présentées dans le chapitre 2.

Les deux colonnes de gauche correspondent aux catégorisations habituelles des images biomédicales. Même à partir des signaux physiques qui sont à l'origine de l'image (deuxième colonne), il y a encore 8 catégories, et ces concepts physiques ne sont abordés qu'à la fin de l'enseignement secondaire.

<i>Type d'imagerie biomédicale</i>	<i>Nature du phénomène physique</i>	<i>(grossissement) pouvoir séparateur</i>	<i>Type de mécanisme</i>	<i>Objet observé</i>	<i>Type d'image obtenu</i>
Œil nu, loupe, photo, caméra, endoscopie	Rayonnement visible	(1 à 400) < 1 mm pour l'endoscopie	RÉFLEXION (parfois transparence / opacité)	vivant ou non surface 3D (épaisseurs si transparence)	films, photos, dessins, couleur ou N/B
Microscopie optique	Rayonnement visible	(10 à 3000) 1 μ m	TRANSPARENCE / OPACITÉ	en général coupes de 1 à 20 μ m d'épaisseur	films, photos, dessins, couleur ou N/B
Microscopie électronique (M.E.) transmission	Électrons	(50 à 500 000) 0,2 nm	TRANSPARENCE / OPACITÉ	coupes de 50 à 100 nm d'épaisseur	photos N/B
M.E. cryofracture	Électrons	idem	TRANSPARENCE / OPACITÉ	surface métallisée "ombrée"	photos N/B
M.E. balayage	Électrons	(10 à 200 000) 5 nm	ÉMISSION (apparence de réflexion)	surface 3D	photos N/B
Radiographie	Rayonnement X	0,2 mm	TRANSPARENCE / OPACITÉ	vivant : 3D (toute son épaisseur)	négatifs de photos N/B
Scanner X	Rayonnement X	\geq 0,3 mm	TRANSPARENCE / OPACITÉ	vivant : coupe tomographique	image numérique 2D ou 3D (morphomètre)
Tomoscintigraphie	Rayonnement γ	7 à 12 mm	ÉMISSION	vivant : coupe tomographique	image numérique 2D fonctionnelle (parfois 3D)
T.E.P. (tomographie par émission de positons)	Rayonnement γ	4 à 8 mm	ÉMISSION	vivant : coupe tomographique	image numérique 2D fonctionnelle (parfois 3D)
I.R.M. (Imagerie par résonance magnétique) IRM fonctionnelle	Ondes radio	0,5 à 1 mm (sites hospitaliers) sinon jusqu'à 0,05 mm. 3 à 10 mm en IRM fonctionnelle	ÉMISSION	vivant : coupe tomographique <i>comparaison de plusieurs coupes</i>	image numérique 2D ou 3D, anatomique ou image 2D paramétrique fonctionnelle
EEG, MEG (Électro- et Magnéto-encéphalographie)	Champs électromagnétiques	10 mm (MEG) à 20 mm (EEG)	ÉMISSION	vivant : surface extérieure	image numérique 2D (cartographie) ou paramétrée 3D (localisation)
Thermographie (pour mémoire, car n'est plus utilisée)	Rayonnement infra-rouge	environ 20 mm	ÉMISSION	vivant : surface extérieure	image numérique 2D (cartographie)
Échographie	Ultrasons 3,5 Méga Hertz : 7,5 Méga Hertz : (100 Méga Hertz) :	2 à 3 mm 0,5 à 1 mm. (0,05 mm.)	RÉFLEXION	vivant : coupe tomographique	image numérique 2D ou 3D

Tableau 1. Comparaison succincte des principales familles d'imagerie biomédicale

trois notions
structurantes...

L'objectif du présent travail est de montrer que des notions scientifiques plus transversales permettent de catégoriser cette diversité d'imageries (les trois notions de la colonne centrale : réflexion, transparence/opacité et émission de signaux) tout en étant susceptibles d'apprentissages scolaires dès le primaire et même la maternelle.

La troisième colonne du tableau 1 récapitule des données sur les performances relatives de chaque famille d'imagerie biomédicale. Les perspectives de l'imagerie médicale sont à peu près celles qu'avaient déjà l'anatomie fonctionnelle et la cyto- et histo-physiologie, mais désormais sur des êtres vivants : c'est pour cela qu'il m'a semblé nécessaire de traiter en même temps l'ensemble de ces techniques et images dans le présent texte.

Les deux colonnes de droite montrent que l'aspect des images renvoie à un deuxième ensemble de notions structurantes, ce qui permet de construire le tableau 2.

	Surfaces 3D d'objets	Structures superposées vues par transparence	Coupes tomographiques (voxels → pixels)
RÉFLEXION	Œil nu, loupe, photos... Microscopie électronique à balayage Reconstructions 3D en échographie		Échographie
TRANSPARENCE / OPACITÉ	Cryofracture Reconstructions 3D au scanner (morphomètre)	Œil nu, loupe, photos Microscopie optique Microscopie électronique à transmission Radiographies Scintigraphie plane	Scanner X
ÉMISSION DE SIGNAUX	Thermographie Reconstructions 3D en tomoscintigraphie, TEP, IRM, EEG / MEG		Tomoscintigraphie TEP (tomographie par émission de positons) IRM (imagerie par résonance magnétique)

Tableau 2. Classification des diverses familles d'imagerie biomédicale en fonction des deux types de notions structurantes qui émergent de l'analyse du tableau 1

Les trois colonnes du tableau 2 concernent la problématique 2D / 3D.

- Dans la colonne de gauche, les images de surfaces 3D sont soit ombrées naturellement (œil nu, loupe, photo, microscopie électronique à balayage) ; soit ombrées par un dépôt métallique oblique déposé antérieurement à l'obtention de l'image (cryofracture) ; soit ombrées informatiquement après

... et trois façons
de traduire
des volumes

la reconstitution de la surface 3D (toutes les imageries médicales 3D).

- Dans la colonne centrale, l'image 2D superpose tout ce qui est vu par transparence dans le volume 3D observé. La superposition est d'autant moindre que ce volume est plat (coupes fines) ; mais explorer des volumes plus importants est parfois intéressant (12).

- Dans la colonne de droite, il s'agit des images numériques de coupes tomographiques (figure 5).

3.2. Hypothèses sur les obstacles à la compréhension de ces images

images du squelette : confusions entre radiographie et vision 3D

Les enquêtes que nous avons menées auprès de futurs professeurs d'école (Fisseux 1995 ; Fisseux et Clément en préparation) montrent que la notion de transparence/opacité n'est que très rarement mobilisée lors de la lecture de radiographies. La plupart de ces enseignants débutants confondent les divers niveaux de gris d'une radiographie avec l'ombrage d'un volume ; ils n'ont pas compris que les images radio des structures osseuses qui leur sont présentées (nous avons choisi de travailler sur des radios de main) sont le résultat de différents degrés d'opacité de ces structures aux rayons X.

l'imagerie médicale fascine mais reste magique

En ce qui concerne le scanner X, la scintigraphie ou l'IRM, nos travaux préliminaires montrent que les problèmes sont encore plus importants : l'image est un peu magique ; les principes qui permettent d'observer une coupe tomographique de cerveau vivant sont inconnus ; et même chez des étudiants en médecine, les principes de la RMN (résonance magnétique nucléaire), pourtant au programme, sont vite oubliés. Seul le principe de base de l'échographie est plus souvent compris, par la comparaison avec l'écho.

En revanche, il y a une attirance réelle pour ces images, une fascination même (Clément *et al.*, 1994, Clément 1995) qui mêle l'attrait esthétique à la non compréhension ; ainsi qu'à l'admiration des scientifiques et médecins qui, eux, comprennent. Admiration d'autant plus importante que ces images nous concernent : il peut s'agir de notre corps, de notre santé, ou de celle d'un proche. Elles témoignent ainsi de la supériorité des spécialistes scientifiques, de la distance entre leurs savoirs spécialisés et nos propres connaissances de citoyen ou de malade : cette science admirable est hors d'atteinte, mise en vitrine pour reprendre l'expression de Roqueplo (1972).

Cette double attitude d'implication affective et de distanciation cognitive par rapport à ces images constitue sans doute le premier obstacle à leur utilisation scolaire :

(12) Certains microscopes électroniques (à protons) permettent ainsi, sous de très forts voltages, d'observer des coupes relativement épaisses, pour visualiser la projection 2D du volume de certains organites cellulaires.

la compréhension de l'imagerie médicale n'est pas réservée aux médecins ni aux chercheurs !

cette imagerie serait trop compliquée et réservée aux médecins spécialistes. Cet obstacle fonctionne autant pour les enseignants que pour les élèves.

Le projet du présent travail est justement d'explorer si cet obstacle fondamental ne peut pas être retourné, et utilisé : en profitant de la motivation vis-à-vis de ces images pour les introduire comme moyens ou finalités de stratégies pédagogiques ; et en luttant contre le découragement *a priori* des enseignants et étudiants face à leur complexité en soulignant qu'elles se rattachent à un petit nombre de problèmes et de phénomènes qui peuvent être l'objet d'enseignements précoces puis de renforcements qui arment l'apprenant pour qu'il ne soit plus désorienté face à elles.

4. PROPOSITION D'ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

4.1. Ombres chinoises

Un premier obstacle relatif à la transparence/opacité vient de la superposition, sur le plan de la radiographie, de plusieurs structures opaques aux rayons X. Ce problème est généralisable à toutes les observations par transparence (colonne centrale du tableau 2), et ma longue expérience d'enseignement universitaire en cytologie et histologie me l'a confirmé pour toutes les observations en microscopie optique ou électronique.

une familiarisation précoce aux ombres chinoises favorisera la compréhension des radiographies et d'autres images biomédicales

Or c'est aussi le problème classique de l'interprétation d'ombres chinoises. L'idée suggérée ici est donc qu'une familiarisation précoce avec le jeu des ombres chinoises favorisera la compréhension des images de radiographie, mais aussi d'autres images biologiques ou médicales fondées sur la transparence/opacité : observations en microscopie optique, ou en microscopie électronique.

Certes ces activités sur les ombres chinoises auront aussi à tenir compte des recherches de didactique sur la lumière et l'ombre : Lacroix (1994) a bien montré que les ombres sont réifiées par les élèves, et que les notions de source lumineuse, rayons lumineux, absorption et opacité, et d'onbrage enfin, sont difficiles à mettre en place.

Je ne veux pas détailler ici les activités scolaires possibles avec des ombres chinoises, que chaque enseignant aura à imaginer en fonction de son propre programme, mais juste signaler certaines perspectives qui restent à adapter et compléter en fonction de l'âge des élèves et du contexte d'enseignement. Par exemple une activité collective pour monter une pièce de théâtre d'ombres projetées sur un grand drap. La projection d'un squelette humain (l'IUFM ou l'Université en ont, ainsi que les lycées ...) ou de son substitut en carton (commercialisé depuis peu) permettrait de visualiser ses différentes images en ombres chinoises. Le prétexte du jeu est à inventer par l'enseignant ; il peut aller du tout littéraire au

théâtre d'ombres
chinoises

tout médical. L'objectif pédagogique qui concerne notre propos actuel est que les élèves identifient les différentes projections 2D possibles d'un squelette 3D, en comprenant les superpositions inévitables et en choisissant les angles les plus favorables par rapport à leur projet (ce projet pourrait par exemple être de construire des silhouettes articulées de squelettes en 2D, pour réaliser un théâtre d'ombres chinoises en l'absence d'un squelette 3D).

Des activités individuelles (ou en plus petits groupes) sont aussi possibles : construire un petit écran en tissu ou papier calque, y projeter les ombres de différents objets, préparer des images 2D découpées qui puissent se substituer à des objets 3D pour former le même type d'images sur l'écran. L'ensemble peut être fixe ou animé. Dès le plus jeune âge, des collages sur une feuille de papier calque, observés ensuite par transparence, sont déjà des familiarisations structurantes.

jeux sur
la transparence
avec divers
niveaux de gris
(calques
superposés, fleurs
séchées...)

Un second obstacle vient de la difficulté à concevoir des degrés divers de transparence/opacité aux rayons X, et à interpréter des niveaux de gris sans les confondre avec des ombrages classiques de reliefs (par réflexion des rayonnements lumineux). Les activités précédentes sont le plus souvent binarisées noir ou blanc. Il ne serait donc pas inutile d'y introduire des objets qui ne sont pas totalement opaques aux rayons lumineux, pour observer des ombres chinoises en différents niveaux de gris : tout objet en verre ou plastique transparent, ou encore des formes découpées dans du papier calque et plus ou moins superposées. Il est à souligner que la superposition de feuilles de papier calque permet d'obtenir tous les niveaux de gris souhaités lors d'une observation par transparence ; il est aussi possible d'y superposer des végétaux séchés (feuilles, fleurs, mousses, algues...), qui peuvent aussi être inclus dans de la pâte à papier pour réaliser des abat-jour : de façon générale, toute réalisation d'objets à observer par transparence peut être formatrice.

Rappelons que l'objectif est que l'enfant interprète différents niveaux de gris en termes de différents niveaux de transparence/opacité aux rayons lumineux, pour ne pas commettre les erreurs d'interprétation dont nous avons noté la fréquence effarante chez des futurs professeurs d'école. Il s'agit par exemple de comprendre que l'image plus blanche (sur négatif) du squelette du coude vient de la superposition d'os, ou que le contour plus blanc de l'humérus vient de la forme cylindrique de cet os long : les rayons X traversent une plus grande épaisseur d'os sur sa périphérie.

Certes, toutes les activités scolaires que je viens d'évoquer concernent des images où plus une structure est opaque, plus elle est sombre sur l'image. Alors que c'est l'inverse sur les radiographies puisqu'elles sont observées sur négatifs photos. Le passage du positif au négatif est un pas supplémentaire dans la stratégie pédagogique proposée : par

ateliers photo

exemple en photographiant en noir et blanc les écrans fabriqués à partir de calques superposés (ou de plantes) et observés par transparence : un travail sur ces négatifs photo (utilisant un projecteur à diapositives) permet ainsi de visualiser l'inversion des niveaux de gris par rapport aux originaux observés par transparence : comme sur les négatifs des radiographies habituelles.

De façon plus générale, tout travail photographique (noir et blanc) peut être en soi une introduction aux notions de transparence/opacité, puisque le négatif est observé par transparence : c'est alors le seul tirage sur papier des négatifs qui fait appel à la notion de transparence/opacité.

jeux et travaux
à partir de vraies
radiographies

Est-il besoin de le préciser ? Un travail direct avec des vraies radiographies est possible dès le plus jeune âge (fin de la maternelle, primaire), et peut introduire, accompagner, ou couronner les activités qui viennent d'être suggérées. Un médecin peut être invité à l'école dans cette perspective, à la fois pour motiver les élèves (liens avec la vie quotidienne) et pour présenter la pratique de la radiologie ainsi que pour répondre aux questions (cela se pratique déjà dans plusieurs écoles).

Ces mises en place précoces de notions de base sur la transparence/opacité seront très utiles ultérieurement pour toutes les observations par transparence, tant en microscopie optique qu'en microscopie électronique : pour comprendre la nécessité de coupes d'épaisseur appropriée, l'incidence de l'épaisseur de la coupe sur ce qui est observé, et, en résumé, que l'image d'une coupe est la projection 2D des structures 3D présentes dans l'épaisseur de la coupe.

Par exemple, un jeu sur les ombres chinoises d'une vitre montre que son ombre varie selon son orientation : d'un trait net si la vitre est dans l'axe des rayons lumineux, son image disparaît quand elle est perpendiculaire aux rayons (sauf pour les contours : l'image disparaît réellement si ces contours sortent de l'écran où sont projetées les ombres chinoises). C'est exactement ce qui est observé pour les membranes cellulaires sur toutes les photos de microscopie électronique à transmission (cf. plus haut : figure 3).

4.2. La mosaïque avant l'informatique (pixels et voxels)

Récapitulant toutes les techniques d'imagerie présentées dans la partie 2 de ce texte, les tableaux 1 et 2 montrent que les techniques les plus modernes et les plus performantes d'imagerie médicale visualisent des "coupes tomographiques" qui à la fois ont une épaisseur et sont discrétisées en pixels, chaque pixel représentant la densité du signal d'un voxel (unité élémentaire 3D de la coupe tomographique : figure 5). Des activités simples peuvent aider les élèves à conceptualiser précocement de telles notions.

la mosaïque traditionnelle comme une introduction à l'image numérisée

La mosaïque traditionnelle (13) constitue une excellente préparation à la discrétisation en pixels de toute image numérique. À condition d'avoir des carreaux de même taille, et que chaque carreau ait une surface de couleur (ou niveau de gris) homogène, les mécanismes de construction d'une image en mosaïque sont très voisins de ceux de la numérisation d'une image et de sa visualisation sur un écran d'ordinateur. L'élève pourra s'en convaincre dès qu'il pourra manipuler un ordinateur, en grossissant une image pour la travailler pixel par pixel. Et tout travail sur ordinateur créant ou modifiant ainsi des images sera une bonne familiarisation avec les images numériques biomédicales.

certaines mosaïques (en cubes de verre coloré) comme analogue des coupes tomographiques

Passer de l'image 2D d'une mosaïque, dont on n'observe que la surface, à une mosaïque qui correspond plus à ce qu'est une coupe tomographique, nécessite d'innover. L'équivalent du voxel est alors un petit cube d'un niveau de gris donné (ou d'une couleur donnée) ; il sera plus analogue encore à un voxel s'il est un peu transparent, de façon à montrer que c'est l'ensemble de son volume qui est contrasté ou coloré de la même façon. L'agencement de ces divers cubes, qui ont tous la même taille, forme une image mosaïque homogène dans son épaisseur, et qui peut être observée aussi bien par en dessus que par en dessous, et même dans son épaisseur si les petits cubes sont assez transparents pour révéler l'homogénéité de leur constitution : c'est un bon analogue d'une coupe tomographique (figure 5).

re-discrétisation spatiale, sur écran informatique ou en mosaïque

Ces jeux peuvent comporter une phase de rediscrétisation spatiale : d'une image initiale en tout petits cubes noirs ou blancs, l'élève doit construire une image avec des carreaux correspondant chacun à 4 petits cubes initiaux. Ces carreaux sont par exemple de 5 types, du blanc au noir avec trois niveaux de gris intermédiaires, selon qu'ils correspondent respectivement à 0, 1, 2, 3 ou 4 petits cubes noirs initiaux. Ceci est une introduction active à la notion de différents niveaux de gris, ainsi qu'à la notion de discrétisation spatiale d'une image numérique et à la possibilité de définir des pixels de taille différente pour une même image, dont l'aspect s'en trouve bien sûr modifié. Toutes ces opérations sont plus faciles et rapides sur ordinateur, avec un

(13) Ou le pointillisme en peinture ; ou encore le tissage de perles : dans ce dernier cas, sont introduites des contraintes supplémentaires par rapport à une juxtaposition de cubes qui, eux, restent toujours individuellement interchangeables comme des pixels sur un écran d'ordinateur. La peinture en points juxtaposés permet ces changements, mais élimine en revanche certaines contraintes des pixels : taille identique des points, et leur alignement en damier. Des jeux pour petits enfants (tels que le damier troué dans lequel ils enfoncent des sortes de champignons en plastique et de couleurs variées) introduisent de telles contraintes. Ces exemples sont loin d'être exhaustifs : selon l'âge des élèves, l'enseignant n'a que l'embarras du choix ; et les diverses méthodes ne sont pas exclusives l'une de l'autre : elles peuvent se renforcer pour que l'élève comprenne bien les différentes notions liées à la discrétisation spatiale d'une image.

petit logiciel approprié, mais aussi avec le risque d'être un peu magiques pour l'élève. Les deux types d'approches (artisanale et informatique) me semblent complémentaires.

4.3. Cartographies

Toutes les activités de cartographies sont de bonnes introductions à l'imagerie biomédicale qui visualise la répartition de signaux soit à la surface de l'organe observé, soit dans son épaisseur par une coupe tomographique.

En complément de la réalisation de cartes en relief, qui s'apparente aux activités de coupes sériées décrites plus loin, l'idée de la cartographie est d'établir des correspondances entre des mesures précises (l'altitude) et une échelle de niveaux de gris ou de couleurs arbitraires. Dans les cartographies biomédicales, les principes restent les mêmes, mais l'indice mesuré est différent (température pour les thermographies, caractéristiques du signal magnétique ou électrique dans les MEG ou EEG, degré d'opacité aux rayons X dans une coupe tomographique observée au scanner, intensité des ondes radio émises par une coupe tomographique en IRM, intensité du rayonnement γ émis dans les scintigraphies ou lors de la TEP).

Il serait intéressant que plusieurs photos ou cartes correspondent au même paysage visualisé différemment en fonction des indices photographiés ou cartographiés. Les photos prises par satellite en infrarouge en sont un exemple, mais plus immédiate est la compréhension d'une photo aérienne prise de nuit. Les signaux lumineux émis sont en effet cartographiables, avec interprétation des sources lumineuses photographiées (ville, village, hameau, réseau routier ou autoroutier, densité de la circulation automobile, etc.). Les mêmes mécanismes et démarches sont à la base de la scintigraphie ou de la TEP (tomographie par émission de positons), sauf qu'il s'agit d'émission de rayons γ , et non de lumières visibles.

Le principe de la superposition de plusieurs images, qui est en œuvre dans nombre d'imageries médicales (IRM fonctionnelle et IRM classique ; EEG ou MEG et IRM ; etc.) pourrait également être abordé, avec les problèmes inhérents à toute superposition (même angle de vue, même grossissement, même cadrage à partir de l'identification de points de repères). Ces problèmes seraient ici posés à partir de la superposition de photos aériennes prises de jour et de nuit, et de ces photos avec une carte détaillée. Pour des élèves bien âgés, l'informatisation de ces opérations renouvelle bien sûr ces perspectives, avec des possibilités de travailler ces images sur micro-ordinateur (grossissements, mais aussi autres ajustements liés à l'angle de prise de vue, et possibilités *in fine* de superposer ces images par incrustation).

certaines
cartographies
géographiques
introduisent aux
cartographies
biomédicales

superposer
des cartes qui
donnent
des informations
complémentaires

4.4. Coupes sériées

La technique des coupes est aussi ancienne que l'anatomie : une simple coupe axiale de rein, de cœur ou de cerveau nous renseigne déjà sur leur anatomie interne, tout en présentant l'avantage de situer parfaitement le plan de coupe par rapport à l'organe entier.

Les coupes sériées anatomiques ont ensuite été utilisées pour analyser l'anatomie interne de ces organes ; et les musées d'anatomie (tels que le Musée Testut-Latarjet de l'Université Claude Bernard - Lyon 1, secteur Santé) présentent d'étonnantes tranches successives d'organes humains. Plus récemment, c'est à partir de coupes anatomiques sériées du cerveau qu'ont été construites par ordinateur les images 3D du cerveau largement popularisées dans des documents et films scientifiques (des algorithmes permettent, après numérisation des contours et superposition correcte des images, d'obtenir ces reconstitutions 3D, puis de les faire tourner et de les observer sous n'importe quel angle).

L'histologie et l'embryologie travaillent aussi beaucoup à partir de coupes sériées. Mais elles sont juxtaposées sur une ou plusieurs lames à observer par transparence au microscope, et l'évidence de leur épaisseur disparaît. L'élève ou l'étudiant qui les observe a le plus grand mal à concevoir les structures tridimensionnelles correspondantes, et à imaginer l'orientation du plan de ces coupes (Ndiaye 1990, Clément et Ndiaye 1995). Dans les travaux pratiques universitaires, nous proposons à l'étudiant des documents 3D (par exemple des images prises au faible grossissement du microscope électronique à balayage, ou, à défaut, des schémas 3D) pour qu'ils puissent y situer le plan des coupes qu'ils observent. Quand l'effectif des étudiants et l'équipement de la salle l'ont permis, nous leur avons fait reconstruire manuellement des structures 3D avec un "projectina", c'est-à-dire en projetant l'image de la coupe sur un verre dépoli, puis en dessinant sur papier calque les contours intéressants ; en répétant ce travail sur toutes les coupes, puis en superposant les papiers calques, on reconstitue une projection 2D du volume de l'organe observé. Ce travail est désormais moins frustrant quand il est effectué sur écran d'ordinateur, les algorithmes appropriés permettant d'avoir à la fin une reconstruction 3D de l'organe qui peut être observée sous n'importe quel angle (Clément et Ndiaye 1995) : mais le problème de l'équipement des salles de T.P. demeure.

Quand les médecins observent des coupes sériées de cerveau obtenues par scanner X ou par IRM (figures 4 et 7), ils disposent toujours d'un topogramme construit par l'ordinateur et reproduit dans un coin de la planche photos des coupes sériées (figure 4) : il s'agit d'un schéma où, sur le profil de la tête du patient (une radiographie classique), sont indiqués les plans de coupe, pour situer leur orientation,

dessiner des coupes sériées pour visualiser des structures 3D : du travail artisanal (calques superposés) au travail informatique (image 3D qui tourne)

les manuels scolaires ne font pas comprendre que leurs images médicales de scanner, IRM, scintigraphies... sont des images de coupes tomographiques

leur emplacement et leur espacement. Mais ce type de schéma n'est qu'exceptionnellement reproduit dans les manuels scolaires à côté des images, qui ne montrent qu'une seule coupe tomographique : les élèves ont donc des problèmes légitimes pour situer le plan de coupe qui leur est présenté.

Il est pourtant possible, désormais, de reconstituer des images 3D à partir de la numérisation des images de coupes tomographiques sériées, ceci pour la plupart des techniques d'imagerie médicale présentées plus haut : soit en obtenant une reconstitution anatomique de l'ensemble de l'organe (le cerveau par exemple), soit pour situer une des coupes tomographiques sur l'organe entier, comme si celui-ci avait été sectionné (figure 8). Les manuels scolaires pourront donc à l'avenir choisir de telles coupes en situation 3D dans leur iconographie : les documents de vulgarisation le proposent déjà parfois à leurs lecteurs (figure 8).

À côté de ces suggestions de présentation des images de coupes tomographiques dans les manuels scolaires, des activités ludiques restent à imaginer. L'idée est ici de reconstruire par exemple un cerveau 3D à partir de la superposition de coupes tomographiques sériées au préalable découpées dans du matériel transparent (plexiglas) ayant l'épaisseur de chaque coupe. Il est facile de se procurer les images de coupes sériées (sur négatifs photos) dans les services radiologie des hôpitaux, en faisant disparaître bien sûr le nom du malade pour des raisons éthiques évidentes : figures 4 et 7). L'épaisseur de l'empilement doit correspondre à l'épaisseur du cerveau (calculée d'après le grossissement des images), avec autant de plaques qu'il y a d'images de coupes sériées du cerveau. Ces plaques peuvent être reliées entre elles par un axe métallique vertical, situé dans le coin supérieur gauche de chaque rectangle, de façon à ce qu'il soit possible de faire sortir une des plaques de l'empilement en la faisant pivoter autour de l'axe. La difficulté est de bien centrer chaque image, en prenant des repères par rapport à l'image précédente et par rapport à l'image suivante, pour que la superposition donne le volume de l'organe observé. Le résultat est un cerveau 3D, vu dans la transparence des plaques bien superposées, mais dont on peut extraire à volonté une coupe tomographique, en comprenant bien alors qu'elle correspond à un volume, une tranche de cerveau.

proposition de jeux reconstituant un cerveau 3D à partir de coupes sériées qui sont des mosaïques construites par les élèves

Deux modalités de reconstruction du cerveau 3D sont envisageables.

- Une à partir d'un empilement de plaques plexiglas rectangulaires sur lesquelles les élèves collent l'image négative (après l'avoir découpée) d'une coupe tomographique.
- Une solution où le volume même du plexiglas contient l'information de chaque coupe tomographique. En effet, dans le montage précédent (qui a l'avantage d'être assez facile à réaliser), l'image reste 2D (avec la seule épaisseur du négatif

photo) : elle serait ici 3D. En attendant des kits dont la commercialisation reste concevable, une solution collective peut être mise en œuvre dans une classe : chaque groupe d'élèves fabrique une mosaïque de coupe tomographique de cerveau (voir ci-dessus ; pour servir de modèle, chaque image de coupe tomographique de cerveau doit auparavant être numérisée, discrétisée en un nombre de pixels assez faible, et agrandie : elle ressemble alors à une mosaïque en différents niveaux de gris). La réalisation de chaque mosaïque demande autant de méticulosité que pour un puzzle ; quand elle est réalisée, l'enseignant la valide (des corrections restent possibles), puis elle est encollée pour former une plaque rigide. Et la superposition de ces plaques donne un cerveau 3D, facilement sectionnable pour observer sa structure telle qu'on peut la voir en imagerie médicale.

De telles activités créent bien sûr des motivations pour apprendre l'anatomie du cerveau (l'aide d'autres documents est la bienvenue) ; elles matérialisent et font bien comprendre ce qu'est une image numérique (et ses pixels), ce qu'est une coupe tomographique (et ses voxels) ; elles introduisent aux principes de l'imagerie médicale moderne.

4.5. Autres méthodes pour créer du relief à partir d'images 2D

Deux autres méthodes sont utilisées dans l'imagerie biomédicale présentée plus haut (chapitre 2), pour donner du relief à des images 2D ; je listerai ensuite d'autres méthodes d'imagerie 3D, simplement pour mémoire car, à ma connaissance, elles ne sont pas utilisées dans l'imagerie biomédicale à laquelle nous nous intéressons ici.

• L'ombrage

Les objets observés à l'œil nu, ou encore photographiés ou filmés, renvoient plus ou moins de lumière en fonction de leur relief. Les techniques d'ombrage sont enseignées classiquement pour réaliser des dessins ou des peintures.

Les photographies d'objets observés en M.E. à balayage présentent aussi des niveaux de gris qui rendent compte du volume de l'objet, avec les mêmes codes iconiques que l'ombrage traditionnel.

En ce qui concerne les images obtenues en M.E. par cryofracture, les reliefs de la réplique métallique de la surface métallisée de la cryofracture sont visualisés par dépôt orienté d'un métal opaque aux électrons, qui ombre donc les creux et bosses (sur ces images, on ne peut différencier les creux des bosses qu'en connaissant la direction du dépôt).

Enfin, sur les images numériques de reconstructions 3D à partir de coupes tomographiques sériées (première colonne du tableau 2), un ombrage est introduit sur la surface des

quand il est absent, l'ombrage est rajouté pour donner du volume sur les images (schémas, cryofracture, images numériques 3D)

organes reconstitués, pour leur donner une apparence de relief (figure 8).

• **Notre mouvement relatif par rapport à l'objet observé**

le mouvement rend apparent le relief 3D d'un objet non ombré

C'est aussi un mécanisme fondamental de la vision 3D, mais qui ne peut être mis en œuvre quand nous observons une image fixe. Il redevient possible avec le cinéma, l'objet pouvant tourner face à une caméra fixe, ou la caméra tourner autour d'un objet (ces deux mouvements relatifs étant généralement associés). Certains logiciels de reconstitution d'images 3D à partir de coupes sériées donnent le relief de l'image 3D en la faisant tourner (les parties de l'objet qui sont derrière disparaissent de l'image au fur et à mesure qu'elle tourne) : l'impression de relief est évidente, alors qu'il n'y a aucun ombrage.

• **Autres techniques de vision en relief**

vision stéréoscopique, cinéma 3D...

La vision stéréoscopique binoculaire est utilisée en permanence dans notre vision habituelle mais, pour la mettre en œuvre sur des images, il est nécessaire de disposer de deux images prises avec un angle de vue différent correspondant à notre vision binoculaire. Un dispositif optique simple nous permet d'observer conjointement les deux images, une par chaque œil, et d'en reconstruire une image 3D. Ce procédé est par exemple utilisé dans des T.P. universitaires de géologie pour rendre apparents les reliefs (montagnes, falaises, failles...) à partir de deux photos aériennes. Le cinéma en relief superpose deux images légèrement décalées ; le spectateur doit mettre des lunettes permettant à chaque œil de voir l'une des deux images (dans certains films le filtre d'un œil est vert tandis que l'autre est rouge ; dans d'autres, chacun des deux filtres est un polaroïd).

... effet tapisserie (œil magique")

Une version plus moderne de la vision stéréoscopique a connu un gros succès populaire ces dernières années ; le principe de cet "œil magique" est simple : lorsque plusieurs motifs identiques sont régulièrement juxtaposés (comme dans une tapisserie), la vision stéréoscopique permet, en regardant à travers ce dessin, de fusionner deux à deux les images de ces motifs pour voir l'ensemble net sur un autre plan que celui de la feuille de papier observée : de légers décalages entre les motifs juxtaposés sont alors créateurs de reliefs (Harber et Bielinski 1994).

D'autres types de visualisation stéréoscopique de reliefs à partir d'images 2D sont possibles, par exemple en superposant un réseau sur l'image.

Citons pour terminer un type d'images 3D bien particulier, **l'holographie**, qui n'est pas à ma connaissance utilisée en imagerie biomédicale.

5. CONCLUSIONS

5.1. Le changement de pratiques de références

la finalité
première
d'une image
biomédicale
est le diagnostic
ou la recherche

L'imagerie biomédicale est produite par et pour les biologistes chercheurs, ou par et pour les médecins. Dans le premier cas, les images produites ne prennent de sens que dans le contexte de la recherche menée, et de sa communication à la communauté scientifique dans des revues scientifiques spécialisées. Dans le second cas, les images ne prennent de sens que dans le contexte d'un diagnostic médical, qui sera suivi d'indications thérapeutiques. Dans les deux cas, les spécialistes maîtrisent suffisamment les codes iconiques et scientifiques pour utiliser efficacement l'image en fonction de leurs propres objectifs. Il existe à cet égard une division du travail. Dans un laboratoire de recherche ou sur un site hospitalier, des ingénieurs sont chargés de la maintenance des appareils ; ils maîtrisent la technologie de la production des images, et leur seul objectif est d'obtenir des images nettes et avec le minimum d'artefacts. Ce signifié pour eux devient signifiant pour les chercheurs ou les médecins qui utilisent cette netteté de l'image comme outil pour répondre aux questions posées en produisant des images nouvelles.

sa fonction
devient autre
dans une
pratique scolaire

Quand les mêmes images sont mises à la disposition d'un public non averti à des fins éducatives, il y a un changement total des perspectives (14) : ce qui était un préalable indispensable pour les spécialistes (comprendre l'image pour répondre à leurs problèmes, et donc maîtriser auparavant l'anatomie, la physiologie et la pathologie de l'organe observé, ainsi que la technologie de la production de ce type d'images pour être sûr de ne pas observer d'artefact) devient un objectif d'enseignement (comprendre une image sélectionnée, donc dépourvue d'artefact, pour apprendre à connaître l'anatomie, la physiologie et parfois la pathologie de l'organe observé : la compréhension de l'iconogenèse devient accessoire).

J'insiste donc sur le fait que les "stratégies pédagogiques" proposées dans la dernière partie de ce texte pour préparer progressivement les apprenants à ne pas être désorientés face à l'imagerie biomédicale doivent être insérées dans des projets pédagogiques qui peuvent faire ou non référence à l'imagerie biomédicale. Une activité de cartographie d'un paysage, ou la réalisation d'une mosaïque, ou encore un théâtre d'ombres, n'a pas besoin de faire allusion à l'imagerie médicale. Dans d'autres cas, cette référence peut être utile et motivante, par exemple pour lire des radiographies, ou travailler sur la notion de coupe tomographique. La

(14) Sauf bien sûr quand il s'agit de la formation d'étudiants en médecine ou de personnel paramédical, ou encore de la formation de biologistes à et par la recherche, au niveau DEA ou thèse par exemple.

l'usage de ces images à l'école ou hors de l'école, motive les enfants, mais nécessite des stratégies pédagogiques appropriées

complexité de la relation à son propre corps et à ses images normales ou pathologiques (voir par exemple Gervet 1985, Jodelet 1985, Rumelhard 1986), est alors source d'autant de motivations mais aussi d'obstacles pour aborder un travail sur ces imageries. Des enquêtes effectuées sur le public visé par une exposition sur l'imagerie médicale ont fait apparaître une très forte attente par rapport aux aspects médicaux, qui ont donc été la clef d'entrée de l'exposition et des activités d'ateliers qui y étaient proposées ; et l'ensemble a très bien fonctionné (Wake & Bradburne 1993). De telles entrées sont possibles dans un cadre scolaire.

5.2. Des images construites selon des codes spécifiques

Chaque type d'imagerie biomédicale présenté dans la partie 2 de ce texte fait appel à **des codes iconiques et scientifiques particuliers**, qui créent de véritables règles spécifiques pour interpréter ces images. Le même cerveau peut être observé en scanner X, en IRM ou en TEP. Chaque image offre à interpréter des informations différentes et complémentaires, selon des codes spécifiques.

la "réalité" du cerveau nous échappe, chaque type d'imagerie cérébrale construit une facette de cette réalité

En d'autres termes, l'aspect figuratif de chacune de ces images ne peut être réduit à un "réel" qui serait rendu visible. Ce "réel" est toujours construit, par des interactions entre les structures et phénomènes observés, et l'arsenal technologique utilisé pour effectuer ces observations. À la base de cet arsenal, il y a bien **le transcodage iconique figuratif** (cf. la typologie proposée au début de ce texte). Mais si ce transcodage reste figuratif pour une radiographie ou pour une image de microscopie électronique, pour d'autres images médicales il inclut aussi des **opérations graphiques** : nombre d'imageries médicales sont des images à la fois figuratives et graphiques.

Au total, chaque type d'imagerie témoigne de processus multiples qui créent des codes de reconnaissance très spécifiques : c'est en cela que l'imagerie biomédicale est souvent *a priori* déroutante pour les élèves et étudiants autant que pour leurs enseignants.

5.3. Des notions structurantes pour la compréhension de cette imagerie

la diversité des images biomédicales traduit la diversité des regards scientifiques sur un organe normal ou pathologique

Au delà de cette complexité déroutante de prime abord, il est frappant de constater que les premiers obstacles mis en évidence par nos recherches sur les problèmes liés à la compréhension de l'imagerie biomédicale sont relatifs à quelques mécanismes généraux.

- L'appréhension des enseignants face à ces images qui les désorientent en absence de guide clair : le but du présent texte est justement d'introduire des clefs d'entrée simples sur les catégories de méthodes utilisées, clefs qui pourraient

mais ce foisonnement d'approches s'enracine dans quelques notions structurantes qui sont susceptibles d'apprentissages à tous les niveaux scolaires, y compris les premiers

donner aux enseignants, et par là même ensuite aux apprenants, une assurance minimale.

- La difficulté de compréhension de notions élémentaires qui sont pourtant structurantes, et dont la maîtrise doit se situer en amont d'un contact avec l'imagerie la plus complexe, pour pouvoir l'éclairer. Notions qui, je l'ai souligné à plusieurs reprises, peuvent devenir l'objet de stratégies pédagogiques récurrentes à divers niveaux du cursus scolaire : transparence/opacité, réflexion et enfin émission de signaux physiques.

- La difficulté tenace de concevoir des volumes à partir d'images 2D, mais aussi de concevoir la discrétisation d'une image numérique en pixels, qui renvoient aux voxels 3D des coupes tomographiques visualisées par l'imagerie médicale la plus moderne : diverses activités pédagogiques sont à ce propos suggérées, des plus artisanales aux plus informatisées.

Au total, l'espoir de ce texte est que la clarification proposée soit utile aux enseignants, et induise des innovations pédagogiques pour tester l'efficacité et les limites des propositions faites : l'évaluation de ces innovations permettra alors d'avancer encore par rapport à cette première ébauche de clarification, pour que l'enseignement scolaire sache désormais plus et mieux utiliser ce fascinant potentiel de ressources qu'est l'imagerie biomédicale.

Pierre CLÉMENT
Didactique de la biologie, LIRDHIST,
Université Claude Bernard - Lyon 1

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans une recherche sur l'imagerie biomédicale menée à l'Université Claude Bernard - Lyon 1 (UCBL) avec le soutien de la Région Rhône-Alpes (contrat "recherche en éducation" n° HO 39114 9414).

Je remercie vivement les scientifiques lyonnais qui m'ont donné des renseignements très actuels sur les techniques d'imagerie biomédicale, utilisées dans la partie 2 et pour le tableau 1 :

- le Pr. L. CINOTTI, directeur du CERMEP (Centre d'Exploration et de Recherche Médicales par Émission de Positons), UCBL ;
- le Pr. J. PERNIER, directeur de l'U 280 de l'INSERM (Laboratoire de recherche sur les signaux et processus cérébraux) et UCBL ;
- le Pr. A. BRIGUET et des membres de son Laboratoire de Résonance Magnétique Nucléaire (UCBL et CNRS) ;
- le Pr. M. AMIEL, directeur du Laboratoire de traitement du signal, imagerie numérique et ultrason, URA CNRS 1216, UCBL, HCL ;
- le Pr. R. GOUTTE et I. MAGNIN (INSA de Lyon et URA CNRS 1216) ;
- J.-P. BRES, Département d'Imagerie Diagnostique et Thérapeutique (dirigé par le Pr. AMIEL), Hôpital Cardio-vasculaire, HCL Lyon ;
- J.-Y. CHAPELON, U 281 de l'INSERM, dirigée par le Pr. D. CATHIGNOL (Recherche sur les applications médicales des ultrasons et des rayonnements non ionisants) ;
- le Pr. MALLET (UCBL-Santé) ;
- A. BOYRIVENT, physicien à l'UCBL et directeur du CeFoMaRP (Centre de formation des maîtres et de recherche pédagogique) ;

- A. PERRAT, ingénieur au CMEABG (Centre de Microscopie Électronique Appliquée à la Biologie et à la Géologie, dirigé par J.-M. FRANC) à l'UCBL ; les photos de M.E. des figures 1 et 2 ont été prises au CMEABG (UCBL) ;
- le Dr. H. BRINNEL (Collection A. Renaud et projet d'un Musée de la Radiologie) ;
- le Dr. CHAUVEAU (Centre Léon Bérard) ;

Je tiens finalement à rendre hommage à des scientifiques non lyonnais, figures de proue de la Radiologie, avec qui j'ai eu de très profitables discussions et correspondances : le Pr. PALLARDY (Paris) et le Pr. WACKENHEIM (Strasbourg).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUBERT F., LAISSY J.-P. (1995). *Radiologie et imagerie médicale*. PUF, coll. *Que sais-je ?*, Paris.

BARAT J.-L., LAURENT F. (1992). "Scanner et I.R.M". In *La science au présent*. Encyclopædia Universalis, 118-119.

BASTIDE F. (1985). "Iconographie des textes scientifiques ; principes d'analyse". In B. Latour éd., *Les vues de l'esprit, Culture technique*, 14, 132-151.

BERTIN J. (1967). *Sémiologie graphique*. Éd. Mouton, Paris.

CLÉMENT P. (1992). "La science et ses publics : images et représentations visuelles". In Giordan A., Martinand J.-L., Raichvarg D., *Actes J.I.E.S.*, 14, 123-133.

CLÉMENT P. (1993). *Rapport d'évaluation de l'exposition "Le cerveau, un continent nouveau", co-produite par l'INSERM et le CCST-Grenoble, lors de son passage à la bibliothèque municipale de Lyon*. Document CCST-Grenoble.

CLÉMENT P., DEBARD É., PIOT A.K. (1993). "Cerveaux réels et images de cerveaux, chauves-souris réelles et en images : analyse des réactions individuelles et collectives". In Giordan A., Martinand J.-L., Raichvarg D., *Actes J.I.E.S.*, 15 (*Science et technique en spectacle*), 217-226.

CLÉMENT P. (1995). "Les jugements d'étudiants scientifiques sur des images et objets relatifs au cerveau humain". *Les Cahiers de l'ADMES*, 9 (De l'image papier à l'image numérisée), 123-133.

CLÉMENT P., NDIAYE V. (1995). "De l'image vidéo à l'image numérisée en travaux pratiques de Biologie à l'Université". *Les Cahiers de l'ADMES*, 9 (De l'image papier à l'image numérisée), 113-122.

CLÉMENT P., SCHEPS R., STEWART J. (1996). "Une interprétation biologique de l'interprétation. I - Umwelt et interprétation". *Actes du Colloque de Cerisy "Herméneutique, textes et sciences"*, septembre 1994. PUF, Paris, 25 p.

CLÉMENT P., GAY A., SABATIER Ph. (sous presse). "Images and learning : I - Didactics of biological and medical images". In A. Giordan et Y. Girault ed. *The new*

learning models ; their consequences for the teaching of biology, health, environment education, Z'Éditions (Nice, France), 235-246.

DEVET G.B., WELLS P.N.T. (1983). "Les ultrasons dans le diagnostic médical". In *Les nouveaux moyens de la médecine*. Bibliothèque *Pour La Science*, diffusion Belin, Paris, 62-72.

ECO U. (1968). *La struttura assente*. Traduction française (1972) *La structure absente. Introduction à la recherche sémiotique*. Mercure de France, Paris, 447 p.

EDELMAN C. (1994). "À la découverte du corps humain". In *Le cinéma et la science*, coordonné par A. Martinet. CNRS, Paris, 174-181.

GERVET J. (1985). "La connaissance du corps de l'autre en éthologie : logique du leurre et leurre de la logique". In *L'homme et son corps ; de la biologie à l'anthropologie*. C.N.R.S., Marseille, Paris, 177-196.

HARBER P.G., BIELINSKI M.S. (1994). *The authorized collection of Holusian Art*. N Vision Graphic Inc., London.

JACOBI D. (1987). *Textes et images de la vulgarisation scientifique*. Peter Lang, Berne, 168 p.

JAKOBSON R. (1963). *Essais de linguistique générale*. Éd. de Minuit, Paris.

JODELET D. (1985). "Changement culturel et représentation du corps". In *L'homme et son corps ; de la biologie à l'anthropologie*. C.N.R.S., Marseille, Paris, 129-138.

LACROIX D. (1994). *Ombres et lumières*. Séminaire du LIRDIMS, Université Lyon 1.

LEMIRE M. (1993). "Fortunes et infortunes de l'anatomie et des préparations anatomiques, naturelles et artificielles". In *L'âme au corps, arts et sciences, 1793-1993*. Réunion des musées nationaux / Gallimard / Électa, Paris, 70-101.

MAZIÈRE B. (1987). "La caméra à positons". *Le Courrier du C.N.R.S.*, 66.67.68. (spécial *Imagerie scientifique*), p. 12.

MORRIS C. (1938). *Foundations of the theory of signs*. International Enc. of Unified Sc., I-2. cité par U. Eco 1968/1972.

MORUCCI J.-P. (1992). "Imagerie par ultrasons". In *La science au présent*. Encyclopædia Universalis, 120-121.

MOTTET G. (1993). "Images et démarches scientifiques ; une orientation de recherche". In Giordan A., Martinand J.-L., Raichvarg D., *Actes JIES*, 15, 151-162.

NDIAYE V. (1990). *Évaluation de l'utilisation de la vidéo dans des Travaux Pratiques universitaires de Biologie*. Mémoire de Thèse (Didactique des disciplines scientifiques), resp. P. Clément, Univ. Cl. Bernard - Lyon 1.

PALLARDY G., PALLARDY M.-J., WACKENHEIM A. (1989). *Histoire illustrée de la Radiologie*. Éd. R. Dacosta, Paris, 542 p.

PEIRCE C.S. (1931-1935). *Collected papers*. Harvard Univ. Press, Cambridge. Cité par U. Eco 1968/1972.

PYKETT I. (1983). "Les applications médicales de la résonance magnétique nucléaire". In *Les nouveaux moyens de la médecine*. Bibliothèque Pour La Science, diffusion Belin, Paris, 40-51.

ROQUEPLO P. (1972). *Le partage du savoir*. Seuil, Paris.

RUMELHARD G. (1986). *La génétique et ses représentations*. Peter Lang, Berne, 172 p.

SHAYWITZ A. et al. (1995). "Sex differences in the functional organization of the brain for language". *Nature*, 373, 607-609.

SHULMAN R. (1983). "La spectroscopie des cellules vivantes". In *Les nouveaux moyens de la médecine*. Bibliothèque Pour La Science, diffusion Belin, Paris, 52-60.

TARDY M. (1975). "La fonction sémantique des images". *Études de Linguistique Appliquée*, 17, 19-43.

TAUGOURDEAU P. (1981). *L'homme transparent, ou la découverte du corps humain par l'imagerie biomédicale*. Magnard / Le François / CNRI, Paris, 130 p.

TER-POGOSSIAN M., RAICHLE M., SOBEL B. (1983). "La tomographie par émission de positrons". In *Les nouveaux moyens de la médecine*. Bibliothèque Pour La Science, diffusion Belin, Paris, 28-39.

VÉZIN J.-F. (1984). "Apport informationnel des schémas dans l'apprentissage". *Le travail humain*, 47, 1, p.61-74.

VIGREUX J. (1992). "L'électroencéphalographie quantifiée". In *La science au présent*. Encyclopædia Universalis, 144-145.

WACKENHEIM A. (1987). *Perception, commentaire et interprétation de l'image par les intelligences naturelle et artificielle*. Springer-Verlag, Berlin, Paris, 124 p.

WAKE D.A., BRADBURNE J. (1993). "Au delà de l'œil nu". *Alliage*, 15.

WEILL F.S. (1981). *L'ultrasonographie en pathologie digestive*. Vigot frères, Paris, 2ème édition mise à jour, 511 p.