

Ce chapitre a pour objectif de fixer le cadre applicatif de notre travail. Dans un premier temps nous présentons un rappel sur quelques notions d'anatomie du cerveau humain. Dans un second temps, nous présentons les principes fondamentaux de la technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et les artéfacts associés.

1. Anatomie du cerveau humain :

Le cerveau est la partie la plus volumineuse du système nerveux central. Il est constitué essentiellement de deux hémisphères, séparés par la scissure inter-hémisphérique, et reliés par différentes structures telles que le corps calleux, le thalamus et l'hypothalamus.

Le cerveau est composé de substance (ou matière) grise externe appelée cortex, de substance blanche sous-jacente et de structures profondes appelées noyaux gris centraux. Le cerveau baigne dans un liquide appelé liquide céphalo-rachidien.[LAG10]

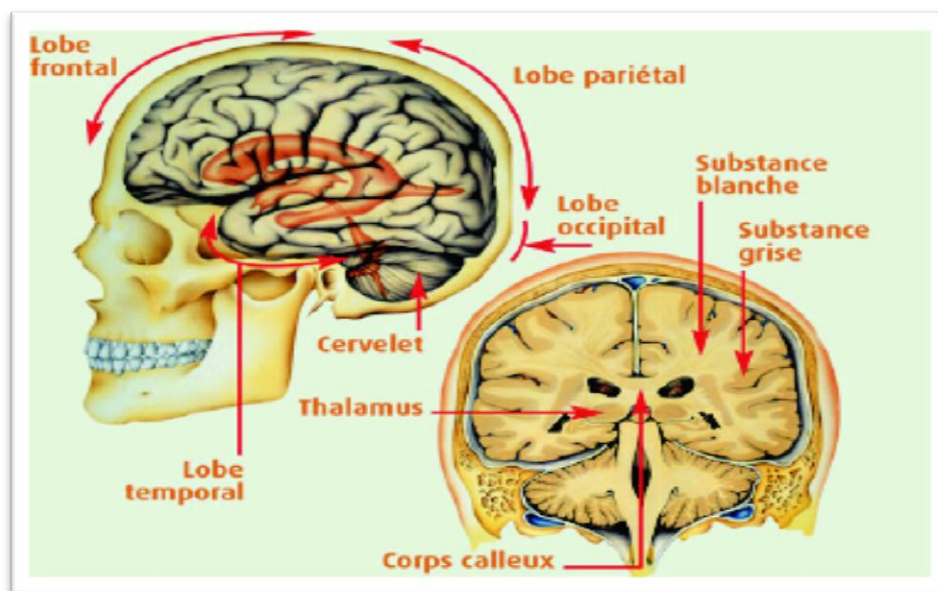


*Fig.1.1. Schéma d'un cerveau humain.
Vue sagittale à gauche. Vue coronale à droite. [LAG10]*

1.1. Le liquide céphalo-rachidien :

Le liquide céphalo-rachidien (LCR) (ou liquide cérébro-spinal, LCS) est le liquide dans lequel baignent le cerveau et le cervelet. D'un volume moyen de 150ml, il est absorbé par le système veineux cérébral et continuellement renouvelé. Ses principaux rôles sont :

- la protection mécanique du système nerveux central contre les chocs par amortissement des mouvements.
- la protection contre les infections, car il contient les médiateurs de l'immunité humorale et cellulaire.
- le transport des hormones entre les différentes régions éloignées du cerveau.

Le liquide céphalo-rachidien (LCR) entoure le cerveau et remplit les ventricules. Il permet de protéger le cerveau des chocs en jouant le rôle d'amortisseur, et remplit des fonctions importantes dans les échanges entre le sang et les tissus nerveux. [BEN08]

1.2. La matière grise :

La matière grise est essentiellement composée de neurones et constitue donc le siège de l'activité cérébrale.

On peut distinguer plusieurs structures composées de matière grise. D'une part, on trouve le cortex, situé à la périphérie du cerveau et d'autre part les noyaux gris centraux.

- **Le cortex:** Le cortex recouvre la totalité du cerveau. Sa surface est importante car il suit toutes les convolutions externes du cerveau, appelées sillons. Son épaisseur est d'environ 2 à 3 millimètres.
- **Les noyaux gris centraux :** Situés au plus profond du cerveau. Ces noyaux sont également composés de matière grise. Les principaux noyaux sont le noyau caudé, qui longe le ventricule latéral, le noyau lenticulaire composé du putamen et du pallidum et le noyau thalamique qui est le plus gros des noyaux centraux. [CYR98]

1.3. La matière blanche :

C'est la partie interne du cerveau, elle contient les liaisons entre les neurones. Elle correspond à la gaine de myéline¹ qui recouvre les axones des neurones pour en accélérer la conduction. Ces axones myélinisés s'assemblent en faisceaux (l'équivalent des nerfs) pour aller établir des connexions avec d'autres groupes de neurones.

Les différents composants du cerveau sont présentés dans la figure 1.2 sur une coupe photographiée post-mortem. [LAG10]

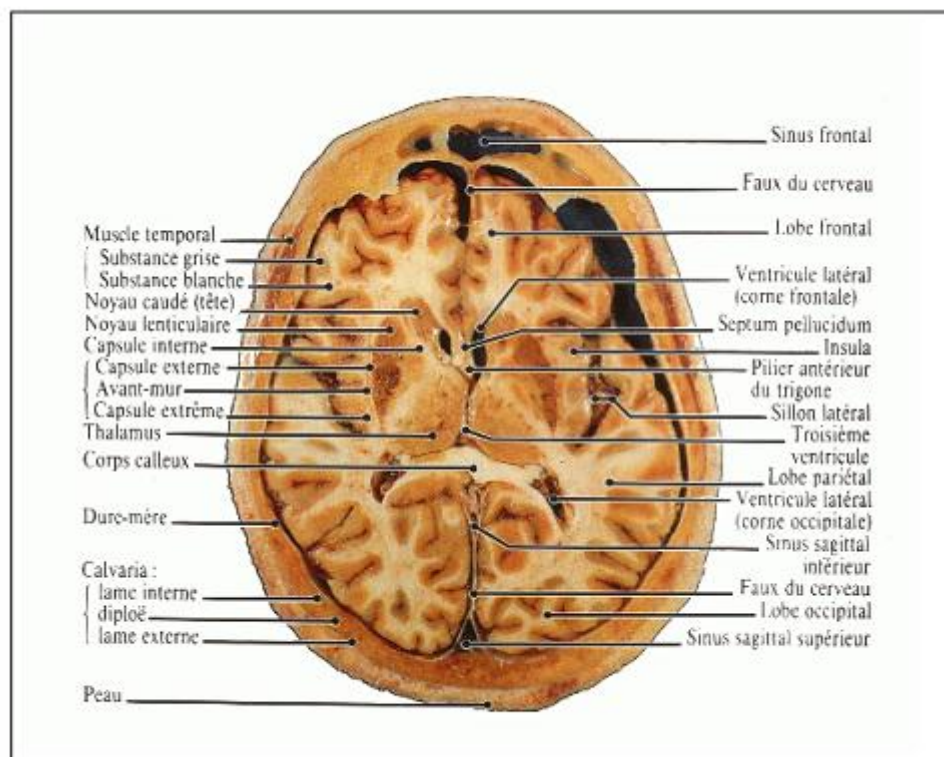


Fig. 1.2. : Photographie d'un cerveau post-mortem, visualisation des principaux éléments. [GER99]

¹ Myéline : substance grasse qui sert à isoler et à protéger les fibres nerveuses

2. Observation du cerveau:

Le cerveau peut être observé par des coupes bidimensionnelles selon plusieurs angles de vue. Il existe principalement trois axes anatomiques qui permettent de réaliser les coupes : **axiales**, **sagittales** et **frontales** (Figure 1.3).

- ✚ **Coupes axiales (ou transverses)** : Ces coupes correspondent quasiment à un plan horizontal. En imagerie de résonance magnétique, elles correspondent à un plan perpendiculaire à l'axe du champ magnétique principal.
- ✚ **Coupes sagittales** : Ces coupes sont prises dans des plans parallèles au plan inter-hémisphérique. Il s'agit de vues latérales du cerveau.
- ✚ **Coupes frontales (ou coronales)** : Ce sont des coupes perpendiculaires aux coupes axiales et sagittales. Elles correspondent à des vues de face du cerveau. [GER99]

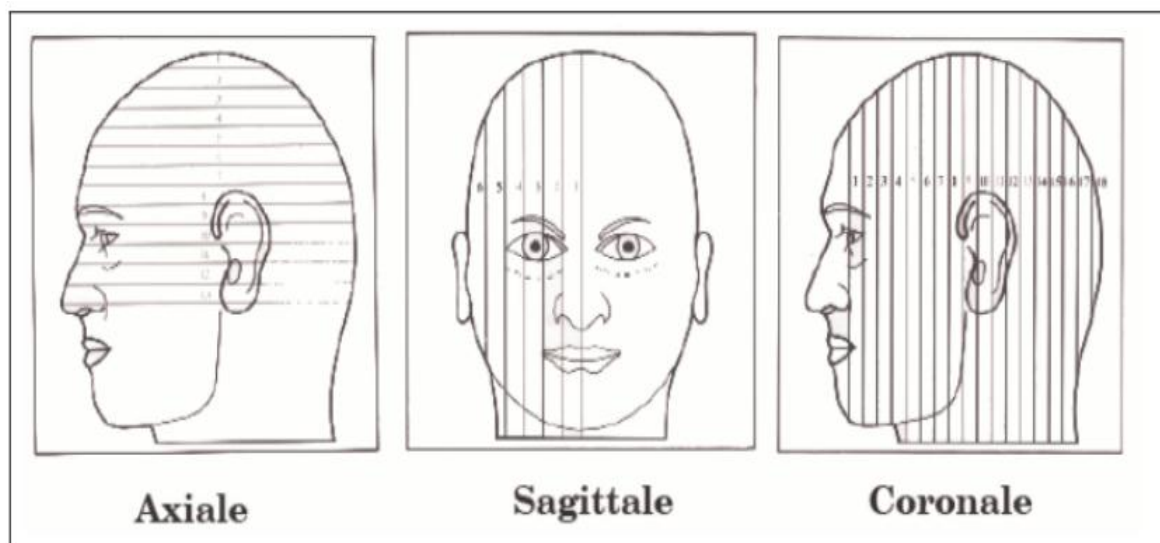


Fig.1.3. : Les trois axes de coupe pour la visualisation du cerveau [GER99]

3. Les caractéristiques tumorales :

Les tumeurs cérébrales présentent une grande variété histologique. Mais malgré ce polymorphisme, leur approche diagnostique est grandement facilitée par l'existence d'une répartition préférentielle en fonction de leur localisation et de l'âge du patient.

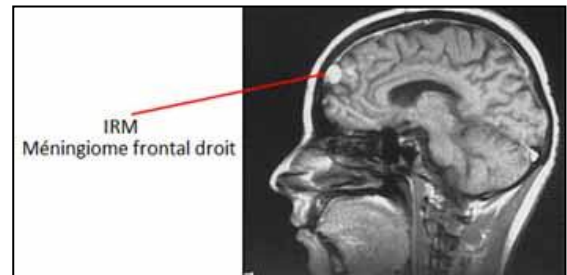
On classe habituellement les tumeurs cérébrales en :

- ✓ Tumeurs extra-cérébrales.
- ✓ Tumeurs intra-cérébrales.

3.1. Tumeurs extra-cérébrales :

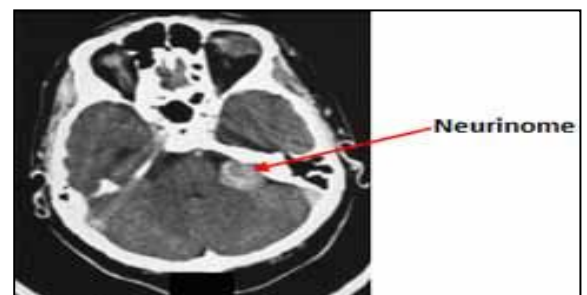
3.1.1. Méningiomes (15% des tumeurs « cérébrales »):

Touchant généralement le patient de 40 à 80 ans (avec prédominance des femmes), ces tumeurs se développent sur les méninges. Ils sont fréquents, bénins, d'évolution lente et encapsulés, mais peuvent atteindre une taille impressionnante avant qu'on ne les détecte (jusqu'à 15 cm). Le méningiome possède un fort potentiel épileptogène du fait de la compression qu'il provoque. Il peut également devenir malin, d'où la nécessité d'une radiothérapie lorsque l'exérèse ne permet pas d'enlever avec sûreté, toute la tumeur. [01]



3.1.2. Neurinomes du VIII (5% des TC) :

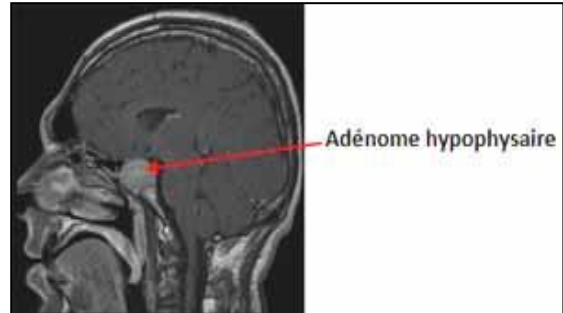
Ce sont des tumeurs du nerf acoustique, se développant à partir des cellules de la gaine de Schwann, dans le conduit auditif interne. Les neurinomes sont relativement bénins, encapsulés et d'évolution lente, survenant chez le jeune adulte (30 ans). On les détecte par les signes comme une hypo, voire une anacusie, des acouphènes



(bourdonnements) ou des sensations vertigineuses, le traitement est une exérèse chirurgicale complète.

3.1.3. Adénomes hypophysaires ou de la tige pituitaire (5% des TC):

Cette tumeur touche surtout l'hypophyse de jeunes femmes adultes, dont les messages hormonaux sont alors perturbés, mais certains hommes aussi, elle est bénigne, encapsulée et d'évolution lente. Les signes sont surtout endocriniens, avec quelques signes neurologiques (céphalées,...).



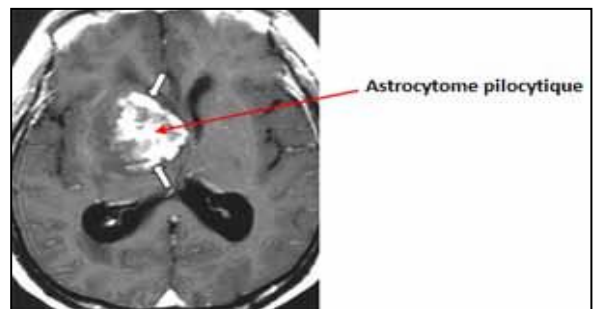
La nature de la tumeur fait qu'il est très difficile de l'enlever, car on risque de toucher l'hypophyse. [01]

3.2. Tumeurs intra-cérébrales :

Les gliomes sont les tumeurs cérébrales les plus fréquentes, on distingue 4 grades de malignité :

3.2.1. Astrocytomes (50% des TC - astrocytes):

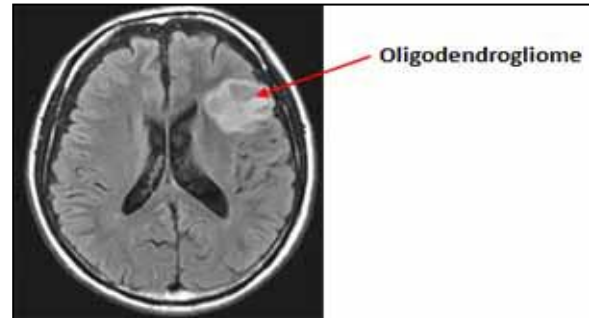
Ils surviennent généralement à l'âge moyen de la vie (40-50 ans), sont diffus et par conséquent ne peuvent bénéficier que rarement d'une exérèse totale. Concernant principalement les hémisphères cérébraux chez l'adulte, les astrocytomes peuvent se développer sur le cervelet, chez l'enfant. Le pronostic est bon chez celui-ci si une exérèse totale est possible. On a souvent recours à un traitement complémentaire par radiothérapie ou chimiothérapie.



Les astrocytomes sont relativement bénins mais l'évolution vers un stade plus agressif n'est pas rare. L'OMS classe les astrocytomes en 4 grades, exprimant notamment leur dangerosité.

3.2.2. Oligodendrogliomes (rares - oligodendrocytes):

Ils surviennent également à l'âge moyen, par prolifération de cellules monomorphes. L'évolution est lente mais le pronostic à long terme (10 ans) est médiocre. Un oligodendrogliome bénin peut rester dans une phase évolutive lente pendant plusieurs années, au cours desquelles un tableau clinique de signes neurologiques tels que des épilepsies, céphalées et vomissements peuvent faire penser à une compression due à la présence d'un massif tumoral. L'acquisition de la malignité n'est pas rare.



3.2.3. Ependymomes (rares – cellules épendymaires dans les ventricules):

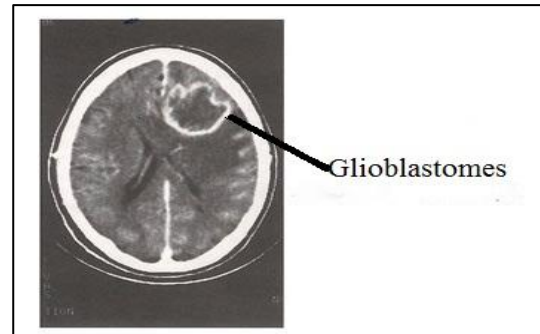
On la trouve surtout chez l'enfant et l'adolescent, chez qui elle provoque souvent des hydrocéphalies et une hypertension par obstruction des ventricules III et/ou IV. L'âge est un facteur important dans l'évolution d'une tumeur cérébrale : pour celle-ci, le pronostic est favorable. Le traitement se fait par exérèse chirurgicale si possible, radiothérapie si nécessaire, et pharmacothérapie.



Ces trois types de tumeur sont considérées comme bénignes au début, ce qui n'est pas le cas des suivants, qui sont malins dès le départ.

3.2.4. Glioblastomes (15% des TC – cellules indifférenciées):

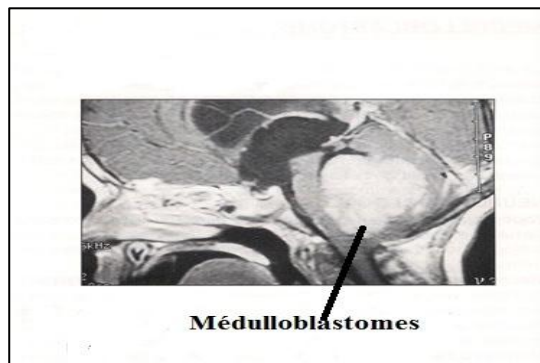
Ces tumeurs présentent un très important polymorphisme (multiplication) cellulaire, et surviennent surtout à partir de la cinquantaine. Elles sont plus fréquentes chez l'homme. L'évolution est foudroyante et le pronostic est létal au delà de 5 ans.



Le traitement se fait par exérèse chirurgicale si possible, radiothérapie si nécessaire, et pharmacothérapie.

3.2.5. Médulloblastomes ou granuloblastomes :

Ils partent du cervelet vers la moelle ou vers le IVème ventricule, sont fréquents chez l'enfant mais rares chez l'adulte. Ils sont plus fréquents chez le garçon, létaux avec de nombreuses récives.



Le traitement se fait également par exérèse chirurgicale si possible, radiothérapie si nécessaire, et pharmacothérapie.

4. Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) :

L'imagerie par résonance magnétique est une technique d'imagerie médicale basée sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN, terme créé en 1930 par Isidor Isaac Rabi ; prix Nobel de Physique en 1944). [BEN08]

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est maintenant l'outil majeur du diagnostic et du suivi thérapeutique de multiples pathologies, en particulier cérébrales, à tous les âges de la vie, du fait de son innocuité, de sa facilité d'utilisation et de la précision des résultats fournis.

L'IRM est une méthode d'imagerie d'investigation *in vivo* non traumatique, capable d'étudier des tissus dits mous tels que le cerveau, la moelle épinière et les muscles. [LAG10]



Fig.1.4. Acquisition par IRM (L'appareil IRM).

4.1. Historique de l'IRM :

L'Imagerie par Résonance Magnétique ou IRM est une technique en développement depuis une cinquantaine d'années, le phénomène physique a été conceptualisé en 1946 par les américains F. Bloch et E. Purcell qui décrivent indépendamment, chacun dans son laboratoire, le phénomène de résonance et de relaxation. Ils obtiendront le prix Nobel de physique en 1952.

Durant la période qui se situe entre 1950 à 1970, Le phénomène de résonance magnétique est d'abord développé pour l'étude de petits échantillons en spectroscopie, puis utilisé sur des tissus d'animaux et enfin sur l'animal vivant.

En 1969, R. Damadian, biophysicien américain, observe que les caractéristiques magnétiques des tissus tumoraux sont différentes de celles des tissus sains.

Par la suite, l'évolution de cette technique sera très rapide de 1973 à 1976. Le chimiste américain P. Lauterbur et le physicien anglais P. Mansfield exploitent les travaux mathématiques réalisés par G. B. Fourier, secrétaire à l'Institut d'Egypte sous Napoléon (la transformée de Fourier est utilisée dans beaucoup d'applications liées à l'imagerie) et améliorent les techniques de recueil des signaux en intégrant des gradients de champ magnétique pour la formation des images. P. Lauterbur crée la première image IRM en 1973 (tubes à essai), puis en 1976 P. Mansfield produit la première image d'un doigt. Ils reçoivent le prix Nobel de Médecine en 2003.

Depuis les années 1980 à nos jours, le premier appareil construit pour l'étude du corps est également à mettre au crédit de la société EMI. Les produits de contraste à base de Gadolinium sont introduits en 1981. Depuis, les techniques d'imagerie se développent avec des temps d'acquisition plus courts et une réduction globale des temps d'immobilisation du patient, des aimants électromagnétiques de plus en plus puissants qui améliorent la qualité de l'image, des bobines de gradients de champ magnétique de commutation plus rapide qui permettent des séquences d'impulsion RF nouvelles, un raccourcissement de la longueur du tunnel d'IRM et une augmentation de son calibre afin de limiter les effets chez les patients claustrophobes, apparition de machines ouvertes sans tunnel . [02]

4.2. Principe de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) :

L'IRM est basée sur les propriétés magnétiques de certains atomes ayant un nombre impair de protons dans leur noyau (^1H , ^{13}C , ^{17}O , ^{19}F , ^{31}P , ^{23}Na , ^{39}K). Ces protons ont la particularité de tourner sur eux mêmes (« spin ») créant ainsi un champ magnétique dipolaire. Ils deviennent alors assimilables à de petits aimants définis par leur moment magnétique. Sachant que l'hydrogène a le moment magnétique le plus important et que le corps humain est composé à 70% d'eau (H_2O), l'Imagerie par Résonance Magnétique est souvent appelée imagerie du proton H^+ .

Pour obtenir une image IRM, c'est sur les variations de signaux émis par ces petits aimants que l'on va s'appuyer, les principales étapes d'une séquence simple d'acquisition sont définies ci dessous :

- Tout d'abord, un puissant champ magnétique B_0 va aligner les moments magnétiques des protons dans la même direction. Cependant si le moment résultant de tous les protons est aligné sur B_0 , les moments magnétiques individuels effectuent un mouvement de précession autour de celui-ci à une fréquence appelée fréquence de Larmor.
- Ensuite, une antenne va émettre brièvement une onde Radiofréquence à la fréquence de Larmor ce qui va faire rentrer les protons en résonance et ainsi perturber l'alignement, modifiant ainsi l'angle des moments magnétiques par rapport à la direction du champ B_0 .
- Enfin, et une fois l'impulsion cesse, les protons tentent à revenir à leur état d'équilibre en dégageant une énergie sous forme de radiofréquences captées par une antenne réceptrice (Figure 1.5). La restitution de cette énergie libérée est à l'origine d'un signal de RMN et les informations qui permettent la reconstruction d'une image IRM. [FOU]



Fig.1.5. Scanner IRM : placement de l'antenne tête réceptrice [FOU]

4.3. Les Artefacts (Les erreurs) IRM :

Les artefacts (les erreurs) d'acquisition en IRM sont de nature très différente de celles observées dans d'autres domaines du traitement d'image (image photographique). On distingue essentiellement quatre Artefacts : le bruit, le mouvement, les effets de volume partiel, et les hétérogénéités d'intensité.

4.3.1. Le bruit :

Le bruit en IRM a un spectre de fréquence très large, assimilable à celui d'un bruit blanc. Ses origines sont multiples. L'ensemble des fréquences communes au bruit et au signal dépend de la bande passante englobant toutes les fréquences de résonance du signal électromagnétique. Plus celle-ci est large, moins le rapport signal sur bruit est bon. [LAG10]

4.3.2. Le mouvement:

Le mouvement peut provenir de plusieurs sources. Il peut être lié au métabolisme comme la circulation sanguine ou la respiration. Il peut également être lié au mouvement du patient pendant l'acquisition. Dans tous les cas, le mouvement diminue la qualité de l'image et pose des problèmes d'interprétation. [GER99]

4.3.3. L'effet de volume partiel :

L'effet de volume partiel est lié à la discrétisation de l'espace : lorsque la surface entre plusieurs objets se trouve dans un même élément de volume discret (le voxel), la mesure dans ce voxel résulte d'un mélange des contributions des différents objets (voir Figure1.6). Cet effet se manifeste principalement à l'interface entre les matières (matière blanche, matière grise et liquide céphalo-rachidien) ou lors de la présence de structures trop fines pour être visibles à la résolution de l'image : vaisseaux sanguins (diamètre de 40µm à quelques millimètres), structures grises fines...

L'effet de volume partiel (Partial Volume Effect, ou PVE en anglais) est particulièrement présent à l'interface LCR-MG dans les replis du cortex, car l'épaisseur des sillons corticaux est généralement inférieure à la résolution des images.[CYR98]

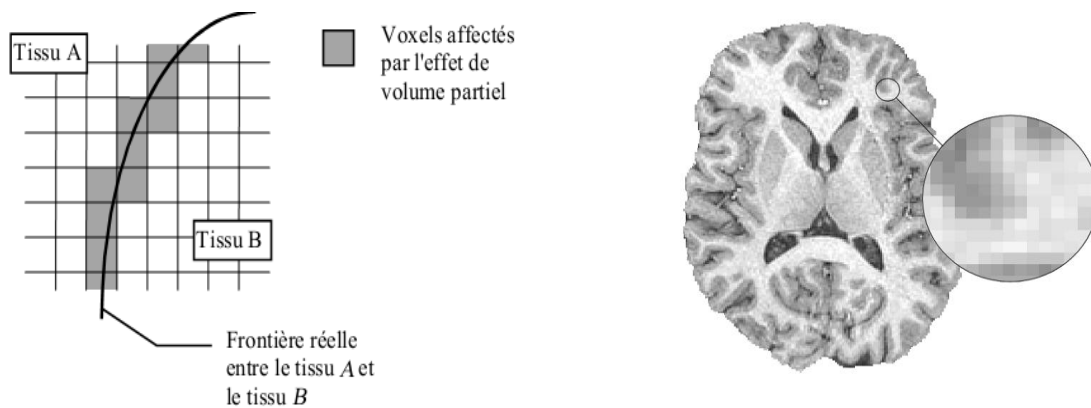


Fig.1.6. Voxel effet de volume partiel [CYR98]

4.3.4. Les hétérogénéités d'intensité :

Une des principales difficultés de la segmentation d'images IRM est la présence d'un artefact d'hétérogénéité d'intensité spatiale pour un même tissu cérébral, l'inhomogénéité peut poser des problèmes de classification pour des techniques de segmentation basées sur l'intensité, si on suppose que l'intensité d'une classe est constante sur toute l'image. [BRI08]

5. Domaines d'application de l'IRM :

De multiples techniques d'exploration, telles que la spectroscopie ou l'angiographie, sont possibles par IRM, dans de nombreux domaines d'application comme par exemple la chirurgie stéréotaxique ou la neuronavigation fonctionnelle. Nous présentons maintenant deux de ces domaines d'application : l'IRM fonctionnelle et l'IRM anatomique.

5.1. L'IRM fonctionnelle :

Avec le développement de techniques ultrarapides d'acquisition et de traitement de données, il est devenu possible de réaliser des images RMN en des temps suffisamment brefs pour suivre certains aspects du métabolisme. On parle alors d'IRM fonctionnelle.

En imagerie cérébrale, on applique la résonance magnétique à l'hémoglobine dont les propriétés magnétiques diffèrent légèrement selon que cette molécule est liée ou non à l'oxygène. On accède donc à l'activité cérébrale en réalisant des images où est visualisé le contraste entre les régions riches en oxyhémoglobine et les régions du flux sanguin. [GIL07]

5.2. L'IRM anatomique:

En médecine, on applique souvent le RMN aux noyaux d'hydrogène, élément présent en abondance dans l'eau et les graisses des tissus biologiques. C'est la structure anatomique du cerveau que l'on visualise en coupes montrant les détails des structures cérébrales (matière grise, matière blanche) avec une précision millimétrique. Cette imagerie "anatomique" est utilisée par les radiologues pour la détection et la localisation de lésions cérébrales ; on parle alors d'IRM anatomique. [GIL07]

6. Avantages et inconvénients de l'IRM :

Les principaux avantages de l'IRM :

- Sur le plan anatomique, c'est la méthode d'imagerie qui, dans la plupart des cas, donne les informations les plus riches. La résolution spatiale habituelle est de l'ordre du millimètre, c'est-à-dire du même ordre que celle du TDM, mais l'IRM permet d'acquérir des coupes dans toutes les directions de l'espace. Elle permet en plus de réaliser des acquisitions tridimensionnelles qui peuvent être reconstruites à posteriori selon n'importe quelle incidence de coupes.
- Le nombre important de paramètres mesurés par l'IRM est aussi un avantage dans la mesure où une même pathologie peut être vue dans plusieurs contrastes permettant une meilleure caractérisation. C'est ainsi qu'au niveau du cerveau, aucune autre méthode ne permet de mieux distinguer la substance grise et la substance blanche du cerveau qui sont pourtant très proches.
- L'innocuité de la méthode est aussi un avantage important, puisque aucun rayonnement ionisant n'est utilisé.

Les principaux inconvénients sont de deux ordres :

- L'IRM nécessite des aimants très puissants, lourds, encombrants et très chers.
- Un des autres inconvénients de l'IRM est l'inconfort du patient durant cet examen : le sujet est maintenu à l'intérieur d'un tube étroit et subit un bruit important. Le bruit, produit par les appareils fournissant à cadence élevée des impulsions électromagnétiques, est relativement fort.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les notions essentielles liées à l'anatomie du cerveau ainsi que les principes d'acquisition des images par résonance magnétique qui apporte une aide consistante en termes de diagnostic précoce et de caractérisation des tissus cérébraux.

On a remarqué qu'il y a des problèmes liés à l'anatomie du cerveau humain du fait qu'elle est compliquée dans le sens où elle présente de nombreuses structures cérébrales enchevêtrées, très diverses dans leurs formes et dans leurs compositions tissulaires. On peut se rendre compte des difficultés que rencontre le praticien (d'hétérogénéité des tissus cérébraux, bruit, l'effet du volume partiel, ...etc.) pour détecter et déceler toute anomalie qui peut se trouver au niveau du cerveau, d'où le grand intérêt que présente une bonne opération de segmentation.

Nous avons donc, présenté le principe d'acquisition des images de résonance magnétique. Ensuite nous avons donné les avantages et les inconvénients de la technique d'IRM et sa place parmi les autres techniques d'imagerie médicale.