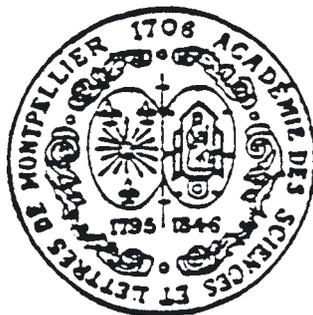


BULLETIN
DE
L'ACADÉMIE DES SCIENCES
ET LETTRES
DE
MONTPELLIER



NOUVELLE SÉRIE
TOME 39
ANNÉE 2008

ISSN 1146-7282

Séance du 26 mai 2008

Deux aspects des nanotechnologies : optronique et spintronique

par Jean-Pierre NOUGIER

Cette conférence fait suite à celle que j'ai donnée le 19 Novembre 2007 à l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier ⁽¹⁾. Je reprendrai ici le point de vue adopté dans ce précédent exposé, consistant à décrire les nano objets à partir des propriétés physiques associées, et plus précisément à partir des phénomènes quantiques mis en jeu. Dans cet exposé avaient été décrites dans un premier temps les étapes ayant mené de la microélectronique à la nanoélectronique, et dont l'aboutissement actuel peut être d'une certaine manière illustré par l'installation au CINES (Centre Informatique Nationale de l'Enseignement Supérieur, installé à Montpellier) d'un super ordinateur de 147 Tflops, capable d'effectuer 147 000 milliards d'opérations par seconde ! Dans un second temps, j'avais indiqué quelques propriétés et applications de l'onde associée à une particule libre, dont l'illustration était constituée par les images en microscopie électronique et en microscopie à force atomique.

Dans l'exposé qui suit, je traiterai de la particule dans un puits de potentiel, dont les propriétés seront appliquées à l'optronique (utilisant les propriétés optiques des électrons) et de la spintronique (utilisant le spin de l'électron), deux disciplines ayant conduit à la réalisation de nombreux nano objets utilisés dans les applications nombreuses et quotidiennes.

1 – Etats électroniques quantifiés

1.1 – Niveaux d'énergie d'un atome

Lorsqu'un gaz est excité par un champ électrique, c'est-à-dire est mis sous tension, il émet de la lumière, c'est ce que l'on observe dans les tubes au néon (le gaz est ici le néon). Contrairement à la lumière d'un corps chaud (par exemple le soleil) dont le spectre est continu, le spectre lumineux des gaz est constitué de raies, c'est-à-dire d'un ensemble de longueurs d'onde bien précises.

La théorie classique prédit que les atomes sont instables. En effet, toute particule électrique sujette à une accélération émet un rayonnement électromagnétique donc perd de l'énergie : c'est le principe même des antennes radio, qui parcourues par un courant sinusoïdal émettent une onde donc rayonnent de l'énergie. Il s'ensuit qu'un électron en orbite autour du noyau devrait émettre un rayonnement électromagnétique donc perdre de l'énergie et finalement devrait s'écraser sur le noyau : un atome ne pourrait donc pas se trouver dans une configuration stable, ce qui est contraire à l'observation.

Pour résoudre cette contradiction, en 1913 le danois Niels Bohr émet l'hypothèse que les orbites des électrons sont quantifiées, c'est-à-dire que dans l'état stable les rayons des orbites des électrons, ou encore les énergies des électrons, ne peuvent prendre que des valeurs bien définies. De façon plus précise, il émet l'hypothèse que

l'électron est en orbite circulaire autour du noyau, que la circonférence de l'orbite est un multiple de la longueur d'onde associée à l'électron, et il postule d'autre part qu'un rayonnement électromagnétique ne peut être émis que si l'électron change d'orbite, c'est-à-dire d'énergie : lorsqu'il passe d'une orbite d'énergie E_2 à une orbite d'énergie plus petite E_1 l'énergie perdue se retrouve sous forme d'un rayonnement à la fréquence ν telle que : $E_2 - E_1 = h \nu$ où h est la constante de Planck. Ces hypothèses permettent de calculer exactement les longueurs d'onde observées pour les raies d'émission de l'hydrogène (Figure F1.1), dont on avait jusqu'alors établi un catalogue sans pouvoir les expliquer.

Quelques années plus tard, la résolution de l'équation de Schrödinger appliquée au cas de l'atome d'hydrogène confirme la répartition des électrons en niveaux d'énergie mais décrit l'électron non plus comme une particule en orbite autour du noyau mais comme un paquet d'ondes à partir duquel on peut définir seulement une "orbitale" qui décrit la probabilité de présence de l'électron.

La figure F1.2 illustre ce qui précède : on y a montré 7 niveaux d'énergie. L'état fondamental correspond au niveau d'énergie le plus bas (a) ; si l'on communique de l'énergie à l'électron, il peut occuper un état excité (b) : cette énergie peut provenir d'un champ électrique (tube au néon mis sous tension par exemple), d'un échauffement, d'une collision avec un autre atome, etc. ; lorsque l'électron revient dans un état d'énergie plus faible (c), l'énergie perdue est restituée sous forme d'un champ électromagnétique, à une fréquence telle que l'énergie perdue est égale à $h \nu$: c'est de la lumière si cette fréquence tombe dans le spectre visible ; les raies d'émission de l'hydrogène dans le spectre visible (figure F1.1) correspondent à des transitions de l'électron l'amenant sur le niveau d'énergie E_2 (figure F1.2) : les couleurs des flèches représentant ces transitions correspondent aux couleurs des raies d'émission lumineuse.

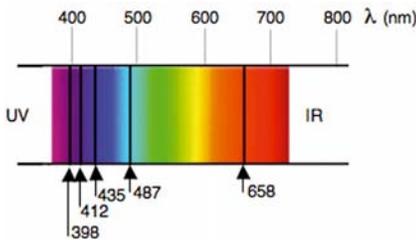


Figure F1.1 : Spectre de l'atome d'hydrogène

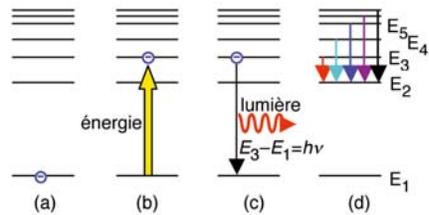


Figure F1.2 : Electron dans son état fondamental (a) ; dans un état excité (b) ; émission de lumière (c) ; raies de l'atome d'hydrogène (d)

1.2 – Bandes d'énergie d'un solide

Si l'on prend deux atomes identiques isolés, par exemple deux atomes d'hydrogène, les niveaux d'énergie stables de leurs électrons sont évidemment les mêmes (figure F1.3.a), mais si on couple ces deux atomes pour en faire une molécule, chaque niveau d'énergie est dédoublé (figure F1.3.b). Dans un solide cristallin, un très grand nombre d'atomes sont couplés entre eux, de sorte que chaque niveau d'énergie est éclaté en un grand nombre de niveaux qui constituent un continuum,

créant une bande d'énergie où les électrons peuvent se trouver dans un état stable, c'est une bande permise (notée "bp" sur la figure F1.3.c). De même que, pour un atome, un électron ne peut pas se situer entre deux niveaux d'énergie, dans un solide un électron ne peut pas se situer entre deux bandes permises : l'espace énergétique compris entre deux bandes permises est appelé bande interdite (notée "bi" sur la figure F1.3.c).

Comment se comportent les électrons dans un tel matériau ? A peu près de la même manière que des voitures dans un parking à étages : les différents étages du parking correspondent aux bandes d'énergie permises, les voitures peuvent y circuler, les espaces entre deux étages correspondent aux bandes interdites. Lorsque des voitures pénètrent dans un parking, elles occupent d'abord le niveau le plus bas. De même les électrons occupent la bande permise correspondant à l'énergie la plus petite. Lorsque le niveau bas est plein, les voitures commencent à occuper le niveau suivant, tout comme les électrons, et ainsi de suite. La dernière bande d'énergie pleine (le dernier étage du parking complet) s'appelle la "bande de valence". La bande permise suivante (l'étage suivant du parking) est la "bande de conduction", la bande interdite entre les deux s'appelle le "gap".

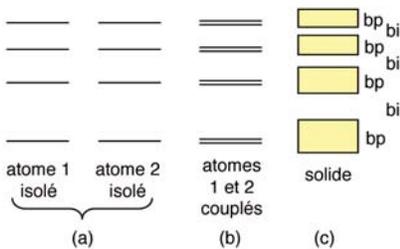


Figure F1.3 : Niveaux d'énergie des atomes 1 et 2, (a) isolés puis (b) couplés, (c) bandes d'énergie d'un solide

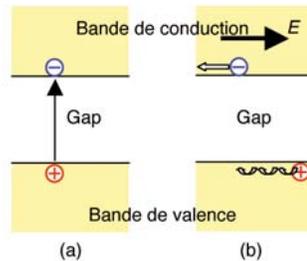


Figure F1.4 : (a) Constitution d'une paire électron-trou et (b) mécanisme de conduction sous l'effet d'un champ électrique E

Qu'est-ce qu'un corps conducteur de l'électricité ? C'est un corps qui comporte quelques électrons dans sa bande de conduction (il y a quelques voitures à l'étage supérieur du garage) : à très basse température, au zéro absolu, tout est gelé, mais le moindre champ électrique appliqué met en mouvement les électrons de la bande de conduction, un courant électrique se crée (d'où le nom donné à la bande de conduction) : les voitures peuvent facilement voyager sur cet étage presque vide du parking.

Un isolant au contraire est un matériau qui ne contient pas d'électron dans la bande de conduction (tous les étages du parking sont pleins, l'étage supérieur est inaccessible) : toutes les bandes étant pleines un champ électrique ne peut pas déplacer les électrons, c'est l'équivalent d'un garage complet.

La différence entre un isolant et un semiconducteur est la largeur du gap. Tous deux ne sont pas conducteurs à très basse température, mais à température ambiante l'isolant ne conduit pas l'électricité alors que le semiconducteur conduit un peu l'électricité. La raison en est qu'à température ambiante, les atomes du réseau cristallin

vibrent à cause de l'agitation thermique, qui croît avec la température, cette agitation communique de façon aléatoire de l'énergie aux électrons ; cette énergie est en moyenne de l'ordre de 40 meV (milli électrons volts). Si le gap est trop grand, de l'ordre de la dizaine d'électrons volts, pratiquement aucun électron n'acquiert une énergie suffisante pour sauter de la bande de valence dans la bande de conduction, le matériau reste isolant. Si le gap est de l'ordre de l'électron volt, une petite fraction d'électrons peuvent avoir suffisamment d'énergie pour sauter dans la bande de conduction, où ils sont très mobiles et sont mis en mouvement si l'on applique un champ électrique.

Une autre manière de voir les choses consiste à dire que dans un métal, conducteur de l'électricité, chaque atome contient un ou deux électrons très peu liés à son atome, le moindre champ électrique crée un courant important. Dans un isolant au contraire, chaque électron est lié à son atome : si la liaison est forte, l'agitation thermique est insuffisante pour arracher des électrons à leurs atomes, il s'agit d'un isolant ; si la liaison n'est pas très forte, l'agitation thermique peut arracher quelques électrons à leur atome, le matériau est semiconducteur.

Comment s'effectue la conduction électrique dans un semiconducteur ? Si par un moyen quelconque on communique assez d'énergie à un électron pour le faire passer de la bande de conduction dans la bande de valence, c'est-à-dire pour l'arracher à son atome, il laisse une place vide, l'équivalent d'un électron qui serait chargé positivement : cette charge positive fictive est en réalité l'absence d'électron, c'est un "trou" (figure F1.4.a). Ainsi le Silicium comporte 14 neutrons, 14 protons et 14 électrons, il est électriquement neutre ; si on lui arrache un électron, l'atome comporte 14 protons et 13 électrons, il est chargé positivement. Si l'on reprend l'image du parking, on éjecte une voiture à l'étage supérieur (la bande de conduction), il reste dans l'étage qui était plein une place vide, un trou, une absence de voiture. En présence d'un champ électrique dirigé par exemple vers la droite (figure F1.4.b) :

- les électrons de la bande de conduction sont mis en mouvement et créent un courant d'électrons, se déplaçant dans le sens opposé au champ électrique donc vers la gauche. De même les quelques voitures à l'étage supérieur du parking pourront se déplacer facilement à cet étage presque vide.
- les électrons de la bande de valence pourront aussi se déplacer : un électron pourra occuper la place vacante (= le trou), laissant à son tour une place vacante (un trou), qui de nouveau pourra être occupée par un électron qui libèrera une place (un trou), etc. Ainsi les électrons pourront aussi se déplacer dans la bande de valence, dans le sens opposé au champ (donc vers la gauche), mais tout se passe comme si c'est le trou qui se déplace vers la droite, ainsi dans la bande de valence on parlera d'un "courant de trous". De la même façon à l'avant dernier étage du parking, la place laissée vacante pourra être occupée par une voiture qui libèrera une place qui à son tour pourra être occupée, etc., ce sont les voitures qui se déplacent mais tout se passe comme si c'était la place de parking libre qui se déplaçait en sens opposé.

1.3 – Puits quantiques

Nous avons vu que l'électron lié à son atome ne pouvait pas acquérir n'importe quelle énergie, mais seulement quelques énergies possibles réparties sur des états bien définis.

Il est possible de créer des “atomes artificiels” : ce sont des puits de potentiel, c’est-à-dire des zones où les électrons sont confinés, d’où ils ne peuvent pas sortir, tout comme les électrons sont liés aux atomes. Dans un puits de potentiel tout comme dans un atome, les états permis des électrons ne se répartissent pas de façon continue, mais prennent certaines valeurs bien déterminées : les électrons se répartissent sur des niveaux d’énergie, dont l’espacement dépend de la largeur du puits : plus le puits est étroit, plus l’espacement des niveaux d’énergie est grand ; plus le puits est large, plus l’espacement des niveaux est petit.

On sait réaliser des puits quantiques, il suffit pour cela de prendre certains matériaux en sandwich entre deux autres. La technique la plus couramment utilisée pour cela est l’épithaxie par jets moléculaires (EJM). Le principe de cette technique est illustré figure F1.5 : un substrat cristallin, par exemple de l’arséniure de gallium GaAs, est placé dans un bâti à ultra vide ; autour de ce substrat sont disposées des cellules à effusion, qui contiennent chacune un matériau différent (sur la figure F1.5, de l’indium In, du gallium Ga et de l’aluminium Al) ; lorsqu’on chauffe certaines de ces cellules (ici In et Ga), le matériau qu’elles contiennent se vaporise, la vapeur va se déposer sur le substrat et en refroidissant les atomes s’accrochent et s’ordonnent de façon régulière sur le substrat en constituant un cristal : sur la figure F1.5 on va déposer une ou plusieurs couches de InAs sur un substrat de GaAs.

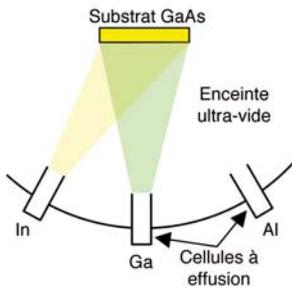


Figure F1.5 : Principe de l’épithaxie par jets moléculaires (EJM), montrant les cellules à effusion projetant des atomes de In et Ga sur un substrat de GaAs

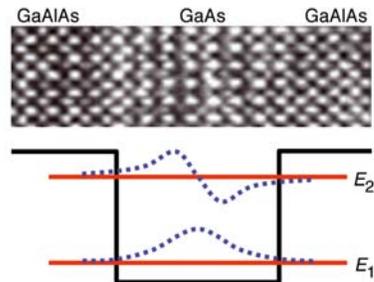
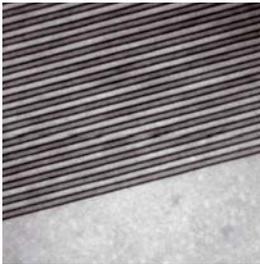


Figure F1.6 : Puits quantique constitué par quelques couches atomiques de GaAs inséré entre des couches de GaAlAs (vue au microscope électronique) ; on a représenté deux niveaux d’énergie E_1 et E_2 et en pointillés les fonctions d’onde associées.

La figure F1.6 représente un puits de potentiel créé dans la bande de conduction par quelques couches atomiques de GaAs pris en sandwich entre du GaAlAs. On a figuré deux niveaux d’énergie : le niveau fondamental E_1 et le premier niveau excité E_2 . En pointillé ont été tracées les fonctions d’onde correspondantes, qui montrent un des résultats surprenants de la mécanique quantique. En effet, le carré de la fonction d’onde est proportionnel à la probabilité de présence de la particule associée à l’onde, qui est ici un électron. La fonction d’onde associée au niveau d’énergie E_1 montre que la probabilité de présence de l’électron est plus grande au voisinage du centre du puits que près des bords, ce qui semble normal : si l’on était

capable de photographier cet électron (ce qui n'est pas le cas !), on le verrait plus souvent au voisinage du centre du puits que près des bords ; par contre, la fonction d'onde associée au niveau d'énergie E_2 montre que la probabilité de présence de l'électron est plus élevée près des bords qu'au centre du puits, en fait l'électron ne se trouve jamais au centre du puits, ce qui est tout à fait surprenant.

L'on peut ainsi compliquer la structure en épitaxiant sur un substrat quelques couches atomiques du matériau 1, puis du matériau 2, puis à nouveau du matériau 1, puis 2, etc., et constituer ainsi un multi puits quantique : la figure F4.3 montre un multi puits quantique constitué d'une alternance de couches d'antimoniure de gallium (GaSb) et d'arséniure d'indium (InAs).



*Figure F1.7 : Photographie prise au microscope électronique en transmission d'un empilement de couches (multipuits quantique) InAs-GaSb de 3 nm d'épaisseur chacune. Les couches de InAs apparaît en sombre, celles de GaSb en clair. Le multi puits quantique est épitaxié sur un substrat de GaSb (en gris clair en bas de la figure).
Source : E. Tournié, Institut d'Electronique du Sud (UMR CNRS 5214), Université Montpellier 2*

Afin que les jets de moléculaires ne soient pas déviés ni pollués, il faut que règne un "ultra vide" (de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-10} torr, ce qui revient à diluer un cube d'air de un dixième de millimètre de côté dans un mètre cube de vide. Dans un tel vide, le libre parcours moyen d'un atome vaporisé est de 1000 km, ce qui signifie que la probabilité qu'un atome rencontre une molécule d'air résiduel est de un demi millionième sur un parcours de 50 cm.

Evidemment les flux de vapeur doivent être soigneusement dosés pour obtenir sur le substrat exactement la composition désirée (par exemple rigoureusement autant d'atomes d'indium que de gallium), la configuration doit être telle que le dépôt soit régulier (ce qui n'est pas le cas sur la figure), la cristallinité doit être aussi parfaite que possible, etc. Tous ces paramètres doivent être contrôlés in situ, de sorte qu'un bâti d'EJM comporte le bâti d'évaporation proprement dit, les pompes à vide, les appareils de caractérisation, l'informatique et l'électronique de commande car bien entendu tout est automatisé : la vitesse de dépôt est typiquement de l'ordre d'une fraction de nanomètre par seconde, la précision doit être de l'ordre de un nanomètre en 10 minutes, un dépôt peut durer plusieurs heures, la stabilité doit être meilleurs que 0,5 % sur une durée de 24 heures.



Un bâti d'épitaxie par jets moléculaires est donc une machine extrêmement compliquée (figure F1.8) qui coûte très cher, typiquement de l'ordre du million d'euros, et nécessite une très grande technicité.

Figure F1.8 : Bâti d'épitaxie par jets moléculaires (Source : Institut d'Electronique du Sud, Université Montpellier 2)

2 – Optoélectronique : photodétecteurs quantiques

L'optoélectronique (ou optronique) étudie les interactions entre l'optique (les photons) et les électrons. Les composants optoélectroniques comportent les détecteurs de photons, les émetteurs de photons, et les transporteurs de photons (fibres optiques).

La photodétection consiste, à l'aide d'un photon de fréquence n , à communiquer une énergie $E = hn$ à un électron pour le faire transiter :

- de la bande de valence, où il ne conduit pas (il ne peut pas se déplacer),
- vers la bande de conduction, où il peut se déplacer donc créer un courant.

Ce processus est illustré figure F2.1, il est nécessaire pour que cela soit possible que l'énergie de l'onde hn soit au moins égale à l'énergie E du gap. Les cellules photovoltaïques et les cellules solaires sont les applications les plus connues de ce principe.

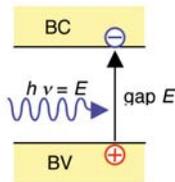


Figure F2.1 : Principe de la photodétection : une onde lumineuse fait passer un électron de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC) si $E \geq \text{gap}$

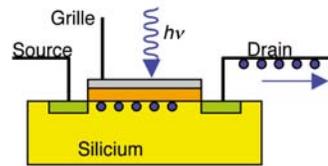


Figure F2.2 : Schéma d'un pixel de caméra CCD, composé d'un transistor MOS (grille métallique, oxyde de Si (en orange) sur substrat de Si

2.1 – Caméras CCD

Tous nos appareils photo et caméscopes numériques utilisent des matrices CCD (Charge Coupled Devices). Une matrice CCD est l'équivalent d'une plaque photographique argentique, ou encore de notre rétine. Elle est constituée d'une myriade de pixels, chacun d'eux est constitué par un transistor MOS (grille métallique (M) déposée sur de l'oxyde de silicium (O) le tout déposé sur un substrat de silicium (S)) comme le montre la figure F2.2. Lorsqu'on prend une photo, des rayons lumineux, c'est-à-dire un paquet de photons, arrivent sur un pixel (figure F2.2), ils créent suivant le principe de la figure F2.1 un paquet d'électrons dans la bande de conduction du silicium. Une fois la photo prise, les paquets ainsi créés sur chacun des pixels sont évacués en appliquant une tension sur la grille pour débloquer le transistor, de la même manière que des personnes voulant éteindre un incendie transportent des seaux d'eau : les caractéristiques de chaque paquet (position, couleur) sont ainsi repérées et transcrits sur un fichier numérique. La figure F2.3 montre une matrice CCD. Les matrices CCD actuelles ont des capacités énormes, contenant chacune aisément dix millions de pixels mesurant chacun $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ sur une surface totale de 1 cm^2 , ce qui signifie que le transistor schématisé figure F2.2 mesure $6 \mu\text{m}$.

La microélectronique permet ainsi de réaliser des caméras beaucoup plus petites que celles utilisant les anciens films argentiques. La figure F2.4 montre une webcam logée au sommet de l'écran d'un ordinateur portable, il s'agit d'une camera CCD permettant d'être filmé et vu à distance via le réseau à n'importe quel point de la planète moyennant l'utilisation d'un logiciel adéquat.

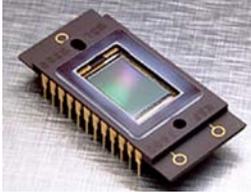


Figure F2.3 : Matrice de CCD
KAF-1600 de Kodak
(source : <http://www.astrosurf.org>)



Figure F2.4 : exemple de caméra CCD miniature : webcam logée au dessus de l'écran d'un ordinateur portable.

2.2 – Photodétecteurs infra-rouge

Les photodétecteurs évoqués ci-dessus détectent la lumière visible, dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,4 et 0,8 μm , correspondant à des énergies comprises entre 2,8 et 1,4 eV (un eV ou électron volt est l'énergie acquise par un électron auquel on applique une différence de potentiel de 1 volt).

Chacun sait que l'atmosphère n'est pas totalement transparente à la lumière visible, en particulier à cause de la vapeur d'eau (ceci est particulièrement perceptible par temps de brouillard). Toutefois, l'atmosphère est transparente aux radiations infra-rouge, dans les gammes de longueurs d'onde 3 – 5 μm et 8 – 12 μm ; en particulier, dans cette dernière bande de longueurs d'ondes, un avion pourrait "voir" à plusieurs centaines de kilomètres. La figure F2.5 montre l'étendue (faible) du spectre visible, et les "fenêtres" atmosphériques correspondant à ces bandes de transmission (en bleu sur la figure). Il est donc important de fabriquer des détecteurs dans ces gammes de longueurs d'onde, d'autant plus que le corps humain à 37 °C émet des radiations dans la gamme 8 – 12 μm .

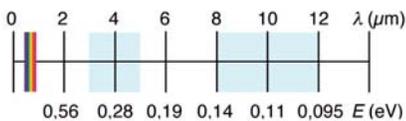


Figure F2.5 : Correspondance entre longueurs d'ondes et énergie. On a figuré les domaines correspondant au spectre visible (arc en ciel) et les fenêtres de transparence de l'atmosphère (en bleu)

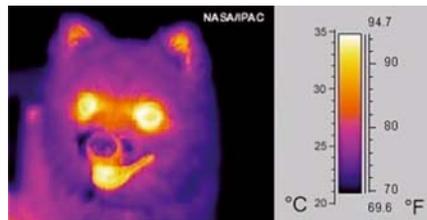


Figure F2.6 : Image infra rouge en fausses couleurs d'un petit chien
(source : <http://www.techno-science.net>)

Les détecteurs infra-rouge obéissent exactement au même principe que ceux dans le visible, à ceci près que leur gap doit être adapté aux longueurs d'onde correspondantes, c'est-à-dire comme le montre la figure F2.5, doit correspondre à des énergies autour de 0,3 eV pour la gamme 3 – 5 μm et 0,14 à 0,10 eV pour la gamme 8 – 12 μm . De tels matériaux peuvent être fabriqués, il s'agit en particulier de InSb (composé d'indium et d'antimoine) et HgCdTe (composé de mercure, de cadmium et de tellure).

Les applications de l'imagerie infra rouge sont très nombreuses, les illustrations de ce paragraphe en donnent quelques exemples :

- dans le domaine industriel : la thermographie de la maison de la figure F2.7 montre les zones mal isolées thermiquement : portes, fenêtres, sommet de la toiture. On peut aussi effectuer une thermographie infra rouge d'un circuit électrique ou d'un circuit intégré pour voir les zones qui s'échauffent le plus, etc. ;
- en médecine : la figure F2.8 montre une mauvaise vascularisation des extrémités des doigts ;

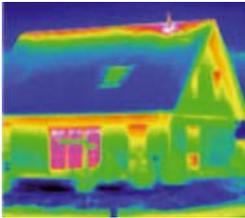


Figure F2.7 : image IR d'une maison montrant les zones mal isolées thermiquement (source : <http://www.x20.org>)



Figure F2.8 : thermographie IR d'une main (source : <http://www.x20.org>)

- en astrophysique : les photographies en infra rouge apportent des informations différentes de celles en lumière visible, notamment concernant la composition des gaz interstellaires. La figure F2.9 montre que les aspects de la nébuleuse d'Orion sont très différents sur les photographies dans le spectre visible et dans le spectre infra rouge.

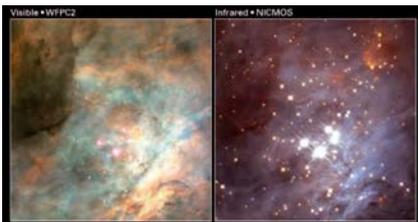


Figure F2.9 : Photographies de la nébuleuse d'Orion dans le visible (à gauche) et dans l'infra rouge (à droite) par le télescope Hubble (source : <http://fr.wikibooks.org/wiki/>)



Figure F2.10 : Photographie IR dans l'obscurité complète d'une intrusion humaine (source : <http://fr.wikibooks.org/wiki/>)

- dans le domaine militaire (combat nocturne notamment) et celui de la surveillance nocturne : la figure F2.10 montre la détection d'une intrusion humaine par photographie infra rouge prise dans l'obscurité complète.

3 – Optoélectronique : émetteurs de lumière quantiques

L'émission lumineuse correspond au phénomène inverse de l'absorption, nous avons déjà rencontré ce phénomène en étudiant l'émission de raies de l'atome d'hydrogène : si dans un semiconducteur un électron de la bande de conduction retombe dans la bande de valence (on dit alors qu'un électron et un trou se recombinent), l'énergie E perdue par l'électron est émise sous la forme d'une radiation électromagnétique de fréquence ν telle que : $E = h \nu$. Ceci est illustré par la figure F3.1 que l'on pourra comparer utilement à la figure F2.1. Les deux types d'émetteurs dont je parlerai sont les diodes électroluminescentes et les lasers.

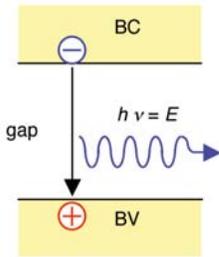


Figure F3.1 : Mécanisme d'émission lumineuse

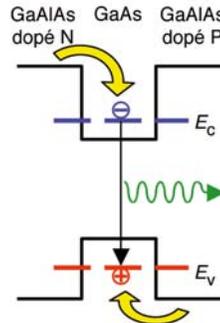


Figure F3.2 : Principe de fonctionnement d'une diode électroluminescente

3.1. Diodes électroluminescentes

On se souvient de la structure en sandwich GaAlAs-GaAs-GaAlAs de la figure F1.6. Une diode électroluminescente (LED) est constituée par une structure analogue (figure F3.2) à ceci près que d'un côté le GaAlAs est dopé N et de l'autre il est dopé P. "Dopé N" signifie qu'il contient des impuretés qui cèdent facilement un électron ; en pratique ici ce la se fait en injectant pendant l'épitaxie un excès d'arsenic. "Dopé P" signifie que le matériau contient des impuretés qui ont un déficit d'électrons, c'est-à-dire qui ont tendance à attirer les électrons sur leur atome, ou encore qu'ils ont un excès de trous ; en pratique ceci s'obtient en injectant un excès de d'aluminium.

Lorsqu'on applique un champ électrique, c'est-à-dire lorsqu'on met la diode sous tension, les électrons en excès de GaAlAs dopé N tombent dans le puits de potentiel de la bande de conduction de GaAs sur le niveau d'énergie E_c et les trous en excès de la bande de valence de GaAlAs dopé P tombent dans le puits de potentiel de la bande de valence sur le niveau d'énergie E_v . Ces électrons et ces trous se recombinent alors, émettant un rayonnement lumineux de fréquence ν telle que : $E_c - E_v = h\nu$.

La LED constitue une source lumineuse très efficace : en moyenne, avec un courant de 1 ampère, on obtient une puissance de un watt, alors qu'avec une ampoule à incandescence on obtient une puissance de 0,1 watt. En conséquence, il est à prévoir qu'une utilisation intensive des LED aura un impact important sur les économies d'énergie et par conséquent sur l'environnement. Aujourd'hui les LED sont utilisées dans les télécommandes, les panneaux d'affichage, les feux de signalisation.

	lm/W	Rendement
Lampe incandescence à filament de tungstène de 100 W	17,5	2,6
Lampe à arc mercure-xénon	50	7,3
Tube fluorescent 28 W	104	15,2
DEL blanche (prototype)	150	22
Lampe à vapeur de sodium haute pression	200	27
Maximum théorique	683	100

Tableau T3.1 : Efficacités lumineuses et rendement de quelques types de lampes

Le tableau T3.1 ci-dessus donne quelques ordres de grandeur de l'efficacité lumineuse (en lumen par Watt (lm/W) de différents types de lampes ; le rendement y est défini par rapport au maximum théorique : par exemple, l'efficacité lumineuse de 17,5 lm/W d'une lampe à incandescence représente 2,6 % du maximum d'efficacité lumineuse théorique 683 lm/W.

Les LED de couleur verte, orange et rouge existent depuis longtemps. La diode bleue, apparue il y a une dizaine d'années, a connu une histoire insolite rapportée par E. Rosencher (2) : depuis 1974, ingénieurs et chercheurs se penchent sur le problème de la réalisation d'une diode bleue, et concluent que le nitrure de gallium (GaN) possède un gap adéquat (3 à 4 eV) et pourrait convenir, à condition de savoir le doper : 10 années se passent sans qu'on trouve de dopant, jusqu'à ce que en 1984 un théoricien renommé démontre qu'il n'est théoriquement pas possible de doper un tel semiconducteur. Toutes les équipes arrêtent alors progressivement leurs recherches sur le sujet, sauf celle du Dr. Nakamura, de la société japonaise Nichia, qui n'avait probablement pas lu l'article du théoricien, et qui en 1993 trouve que le magnésium (Mg) dope le nitrure de gallium ! Dix ans après, cette découverte génère un marché de plusieurs milliards d'euros, car il est maintenant possible, en combinant les différentes couleurs de LED, de réaliser des panneaux publicitaires géants comme le montre la figure F3.3.



Figure F3.3 : Comparaison entre deux panneaux publicitaires utilisant les DEL verts et rouges, et les possibilités offertes grâce aux DEL bleues (source : Rosencher, op. cité)

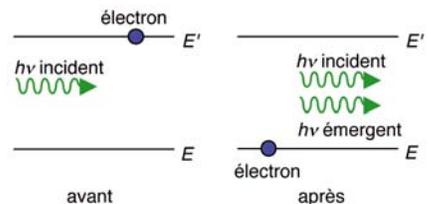


Figure F3.4 : Principe de l'émission stimulée : situations avant et après le choc d'un phonon sur un électron.

3.2 – Lasers

Principe de fonctionnement

Le mot “Laser” est l’acronyme anglais de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, en français “amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement”.

Le principe du laser est basé comme son nom l’indique sur la notion d’émission stimulée. Nous avons déjà vu que, lorsqu’un électron se trouvait sur un état d’énergie excité E' , il avait tendance à revenir sur un état d’énergie plus faible E , en émettant une radiation lumineuse de fréquence ν telle que : $E' - E = h\nu$. Dans certaines conditions, ceci se réalise sans apport d’énergie extérieure, c’est l’émission spontanée, ce phénomène est exploité notamment dans les diodes électroluminescentes. Dans d’autres cas, il est nécessaire d’apporter à l’électron une énergie supplémentaire pour le déstabiliser de son niveau excité E' et le faire redescendre sur le niveau E . C’est ce qui se produit par exemple dans un tube à gaz (tube au néon ou à hydrogène : la tension appliquée au tube excite les électrons sur les niveaux supérieurs, et les collisions entre molécules de gaz déstabilisent ces électrons et les font redescendre sur un niveau plus bas en émettant de la lumière. C’est Albert Einstein qui en 1917, par des considérations purement théoriques, va découvrir ce phénomène dans le cas de l’interaction entre la lumière et la matière.

Or l’énergie lumineuse qu’il faut apporter pour faire retomber l’électron sur le niveau E vaut justement $E' - E$. La situation qui en résulte est représentée figure F3.4 : avant le choc, un photon incident de fréquence ν telle que $E' - E = h\nu$ va percuter l’électron dans l’état excité sur le niveau d’énergie E' . Sous l’effet du choc, l’électron redescend sur le niveau d’énergie E en émettant un photon (dit photon émergent sur la figure F3.4) de même fréquence ν ; après le choc, l’on se trouve donc avec un électron sur le niveau E et deux photons identiques au lieu d’un seul. Si ces deux photons désexcitent deux autres électrons initialement sur le niveau E' , il en résultera 4 photons émergents, on obtient à l’étape suivante 8 photons (figure F3.5), etc., c’est-à-dire une cascade de photons, on a réalisé un amplificateur optique.

Les fibres optiques utilisées en télécommunications à grande distance (par exemple traversant l’océan atlantique) présentent une atténuation qui nécessite de régénérer le signal environ tous les 100 km : ceci se fait à l’aide d’un amplificateur optique utilisant le principe ci-dessus.

Cette amplification optique permet de réaliser un oscillateur laser, schématisé figure F3.6 : c’est un amplificateur optique enserré entre un miroir à gauche et un miroir semi transparent à droite. Supposons que le gain de l’amplificateur optique soit 8 comme sur la figure F3.5, ce qui signifie qu’un photon généré à une extrémité produit 8 photons à l’autre extrémité. Chaque fois qu’un photon est injecté par exemple au niveau du miroir de gauche (figure F3.6), 8 photons parviennent à l’autre extrémité : 4 traversent le miroir semi transparent, 4 sont réfléchis, produisant $4 \times 8 = 32$ photons au niveau du miroir à gauche de la figure ; ces 32 photons se réfléchissent, générant 256 photons à droite dont 128 traversent le miroir et 128 se réfléchissent ; $8 \times 128 = 1024$ photons arrivent à gauche et se réfléchissent, générant 8192 photons à droite dont 4096 traversent le miroir : ainsi à chaque aller retour le gain est de $128/4 = 4096/128 = 32$. On obtient donc en sortie du miroir semi transparent un flux lumineux important et cohérent, si la distance parcourue par la lumière dans l’aller-retour entre les miroirs est un multiple de la longueur d’onde, ce qui crée

des interférences constructives entre les différents flux sortants. Cette oscillation laser est tout à fait analogue à ce qui se passe dans l'effet Larsen, qui se produit lorsqu'on approche un microphone du haut parleur auquel il est relié via un amplificateur : lorsque le micro détecte un bruit, celui-ci est amplifié et passe dans le haut parleur, le bruit amplifié est détecté par le micro qui à nouveau l'amplifie et l'envoie dans le haut parleur, etc. Evidemment ce phénomène ne se poursuit pas indéfiniment, et l'on obtient un bruit important et stable ; de même l'amplification laser ne se poursuit pas indéfiniment, l'on obtient un flux lumineux important, stable et cohérent. Essentiellement deux phénomènes limitent l'amplification : une partie du rayonnement est absorbé par le matériau et transformé en chaleur, le second phénomène est expliqué ci-dessous.

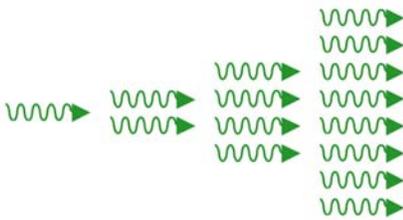


Figure F3.5 : Principe de l'amplification optique

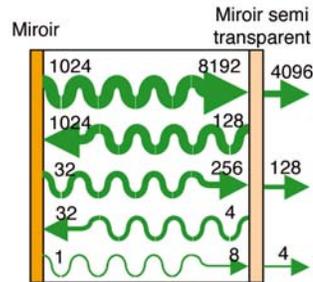


Figure F3.6 : Oscillation laser

Nous avons rencontré jusqu'à présent deux aspects de l'interaction électron-photon : un photon de fréquence ν telle que $E' - E = h\nu$ peut :

- soit exciter un électron d'énergie E et le faire "monter" sur le niveau E' : c'est le principe des photodétecteurs (figure F2.1) : cellules photoélectriques, cellules solaires, détecteurs infra rouge, etc.), dans ce cas le photon est absorbé et il y a atténuation de lumière ;
- soit stimuler l'émission lumineuse d'un électron sur le niveau E' qui redescend sur le niveau E en émettant un photon, c'est l'amplification laser. Or normalement les électrons sont dans l'état fondamental, c'est-à-dire celui d'énergie la plus faible possible, donc il y a beaucoup plus d'électrons dans l'état d'énergie E que dans l'état d'énergie E' : il s'ensuit que, pour obtenir l'effet laser, il faut d'abord inverser les populations, c'est-à-dire exciter les électrons de façon à avoir beaucoup plus d'électrons sur le niveau d'énergie élevée E' que sur le niveau d'énergie basse E . Ceci se réalise à l'aide d'une source lumineuse de fréquence ν telle que $E' - E = h\nu$ qui peut être soit un laser (qu'on désigne par "laser pompe") soit une source conventionnelle.

On voit ainsi que, partant d'un état où l'inversion de population est réalisée (c'est-à-dire que le niveau E' contient beaucoup plus d'électrons que le niveau E), on peut déclencher l'effet d'amplification laser où chaque photon fait redescendre un électron sur le niveau E ce qui crée un autre photon, mais ce faisant on dépeuple le niveau supérieur E' pour peupler le niveau inférieur E , et ces électrons sur le niveau E absorbent de la lumière pour remonter sur le niveau E' , on conçoit ainsi qu'il s'établisse un équilibre entre l'amplification lumineuse et l'absorption de lumière, ce qui limite l'effet laser et empêche le matériau d'exploser ou de se consumer.

Lasers VCSEL

La plupart des lasers à semiconducteurs possèdent une zone active étroite et longue (figure F3.7), les photons se déplacent parallèlement à la surface, c'est-à-dire horizontalement, les deux miroirs sont fabriqués sur la tranche et la lumière est émise par la tranche. Un tel composant ne peut donc pas être réalisé par une technique "planar" similaire à celle utilisée en microélectronique et permettant de fabriquer sur un seul substrat un grand nombre de composants donc de diminuer les coûts.

Depuis quelques années est donc étudiée la possibilité de réaliser des lasers à cavité verticale émettant par la surface, ou VCSEL (pour : l'anglais "vertical-cavity surface-emitting laser"). Le schéma d'un VCSEL est représenté figure F3.8 : la zone active est le multipuits quantique constitué de quelques couches de 5 à 10 nm d'épaisseur chacune, analogue aux structures montrées figures F4.3 et F1.6. Dans une telle configuration, les flux lumineux (les photons) se déplacent verticalement, par conséquent entre les deux faces opposées du laser les photons ne parcourent que quelques nanomètres, ils rencontrent peu d'électrons et la multiplication est très faible : pour augmenter le facteur de multiplication, il faut leur faire parcourir un grand nombre d'allers-retours entre les deux faces, et pour cela utiliser des miroirs ayant un excellent coefficient de réflexion. De tels miroirs sont des "miroirs de Bragg", constitués chacun d'un empilement d'une trentaine de couches transparentes dont l'indice de réfraction varie d'une couche à l'autre, et dont l'épaisseur optique est adaptée à la longueur d'onde de la lumière (exactement un quart de longueur d'onde).

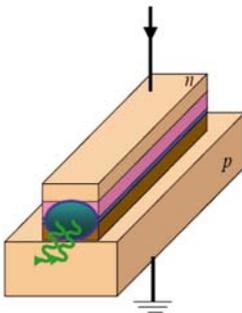


Figure 3.7 : Schéma d'un laser classique émettant par la tranche (source : Rosencher, op. cité)

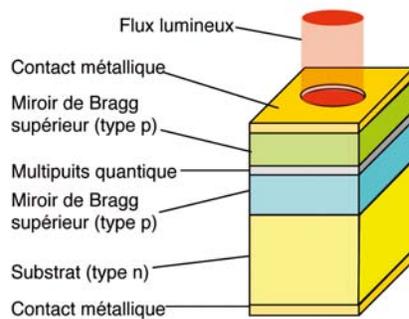


Figure F3.8 : Schéma d'un laser VCSEL

La figure F3.9 ne représente ni les jardins suspendus de Babylone, ni la maquette de l'hôtel sept étoiles qui ouvrira prochainement ses portes dans l'Emirat de Dubaï, ni même une partie des plans d'une église posthume de Le Corbusier. Il s'agit d'une vue de profil, prise au microscope à balayage, d'un miroir de Bragg réalisé par épitaxie par jets moléculaires sur substrat de GaSb, constitué d'une alternance de couches AlAsSb (184 nm) et GaSb (160 nm), d'épaisseur totale 6,8 μm . L'ensemble de cette structure réfléchit 99,98 % de la lumière. Le miroir de Bragg est

un composant essentiel de nouvelles diodes laser VCSEL mises au point à l'Institut d'électronique du Sud à Montpellier. Ces lasers permettent de détecter n'importe quel gaz, même en très faible quantité. Les applications et débouchés sont multiples. Des prototypes élaborés en partenariat avec des industriels identifient et quantifient des gaz polluants de l'atmosphère ou encore détectent rapidement des fuites de gaz. Un laser du même type équipera la prochaine sonde du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) en partance pour Mars afin d'y trouver des traces de vapeur d'eau.

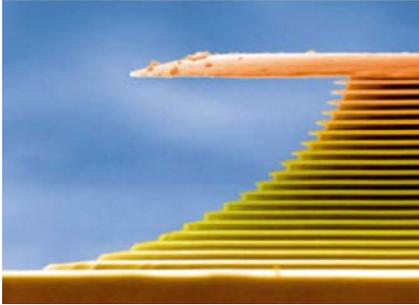


Figure F3.9 : Vue de profil d'un Miroir de Bragg prise au microscope électronique à balayage (source : Institut d'Electronique du Sud, UMR CNRS 5214, Université Montpellier 2)

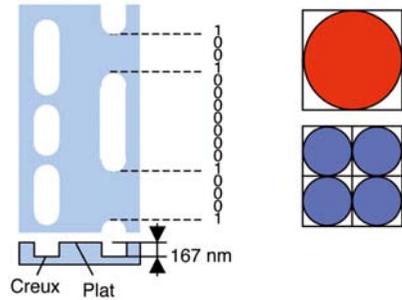


Figure F3.10 : à gauche : schéma de pistes de CD ou DVD montrant les alvéoles en creux ; à droite : avec un laser bleu on peut graver et lire 4 fois plus d'informations qu'avec un laser rouge

Quelques applications des lasers

On connaît les multiples applications des lasers : lecteurs optiques (CD), télécommunications, imprimantes, dispositifs de "pompage" pour de plus gros lasers (de type lasers à solide), pointeurs, etc.

Seul le laser permet de faire entrer la lumière dans une fibre optique, dont le cœur a un diamètre de $4 \mu\text{m}$. Les fibres optiques peuvent transporter une quantité d'informations énormes avec une vitesse considérable : à l'heure actuelle, elles permettent d'envoyer le contenu de toute l'Encyclopedia Universalis à 3 000 km de distance en un dixième de seconde !

Nous avons déjà remarqué l'avantage de la couleur bleue pour les diodes électroluminescentes, où il s'agissait là d'atouts essentiellement d'ordre commercial. En ce qui concerne les lasers, la couleur bleue présente aussi un grand intérêt, mais ici pour des raisons techniques, dans la gravure et la lecture des CD et DVD. Comme le montre la figure F3.10, les pistes d'un disque CD ou d'un DVD sont constituées d'une succession d'alvéoles plus ou moins longues et plus ou moins espacées, lues par un faisceau laser. Chaque alvéole représente un certain nombre de bits d'information (un bit d'information vaut 1 ou 0 : tout fichier numérique, qu'il s'agisse de texte, de son ou d'images, est constitué par une succession de bits). Lorsque le faisceau laser passe d'un plat à un creux ou d'un creux à un plat, le bit correspondant vaut 1, et tant qu'il est dans un creux ou sur un plat, le bit vaut 0 ; la longueur du plat ou du creux permet de définir le nombre de zéros : en effet, sur un CD la taille d'un bit est normalisée et correspond à la distance parcourue par le faisceau

lumineux en 231,4 nanosecondes, soit $0,278 \mu\text{m}$ à la vitesse standard minimale de $1,2 \text{ m/s}$; il y a donc autant de bits 0 successifs que de multiples de 231,4 ns écoulées sur un plat ou dans un creux, et autant de 1 que de sauts entre un plat et un creux. La figure F3.10 montre une séquence de 0 et de 1 sur une piste de CD laser. Cette brève explication va nous permettre de comprendre l'intérêt du laser bleu. En effet, il se trouve que le diamètre minimal d'un faisceau laser est de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde. Il s'ensuit que le diamètre en lumière infra rouge de longueur d'onde 785 nm est deux fois plus grand qu'en lumière bleue de longueur d'onde 400 nm , de sorte que (voir figure F3.10) sur une même surface de disque on peut inscrire et lire quatre fois plus de pistes en lumière bleue qu'en lumière rouge, de plus on peut mieux focaliser un faisceau de longueur d'onde plus petite ; ainsi le "disque bleu" ou BD (blue disk) permet de stocker sur un DVD 27 Go contre 4,7 Go actuellement où l'on utilise une lumière rouge ou infra rouge (un Go est l'abréviation de giga octet, soit un milliard d'octet, un octet valant 8 bits ; à titre d'information, une page dactylographiée est stockée typiquement sur 2 ko, de sorte que 20 Go permettent de stocker 10 millions de pages dactylographiées). Il est donc à prévoir que les appareils de prochaine génération utiliseront des lasers bleus, sauf si la guerre commerciale et technologique entre compagnies qui fait rage actuellement fait que le disque dur magnétique l'emporte sur le disque laser...

3.3 – Boîtes quantiques

Les puits quantiques que nous avons rencontré jusqu'à présent sont unidimensionnels : dans les photos des figures F4.3 et F1.6 ainsi que dans le schéma de la figure F3.8, les électrons se déplacent librement parallèlement aux surfaces des couches, les niveaux d'énergie discrets ne se manifestent que dans leur déplacement perpendiculairement aux couches épitaxiées.

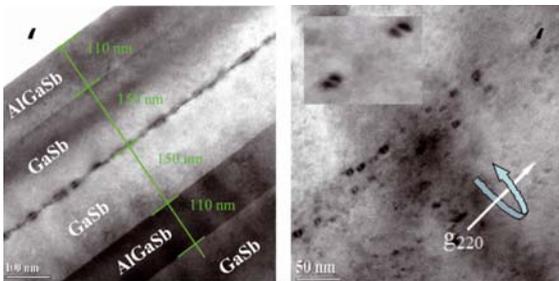


Figure F3.11 : Analyse par microscopie électronique en transmission de 2,4 monocouches ($\sim 0,7 \text{ nm}$) de InSb déposées dans une hétérostructure : la vue de gauche fait apparaître un plan entre deux couches de GaSb où sont localisées les boîtes quantiques de InSb ; la vue de droite est une photographie du plan InSb qui montre que InSb n'est pas constitué d'un empilement de couches, mais d'îlots (boîtes quantiques). En surimpression, une vue rapprochée de deux boîtes quantiques. Source : N. Deguffroy et al. (3)

Les boîtes quantiques semiconductrices au contraire ont des dimensions nanométriques dans les trois dimensions. En pratique, elles sont constituées d'inclusions nanométriques tridimensionnelles d'un matériau de faible gap dans un autre matériau (la matrice) de gap plus élevé. Leur étude suscite depuis deux décennies un engouement particulier dans la communauté scientifique internationale, du fait de leurs

Les boîtes quantiques semiconductrices au contraire ont des dimensions nanométriques dans les trois dimensions. En pratique, elles sont constituées d'inclusions nanométriques tridimensionnelles d'un matériau de faible gap dans un autre matériau (la matrice) de gap plus élevé. Leur étude suscite depuis deux décennies un engouement particulier dans la communauté scientifique internationale, du fait de leurs

propriétés physiques originales. Ces propriétés découlent essentiellement du fort confinement tridimensionnel des porteurs dans les boîtes quantiques, qui conduit notamment à l'observation de niveaux d'énergie discrets, comme dans les atomes. Les boîtes quantiques sont ainsi souvent considérées comme des « atomes artificiels ».

La figure F3.11 montre des boîtes quantiques réalisées comme inclusions de InSb dans du GaSb : ces boîtes quantiques apparaissent comme des îlots, chacune d'elles sa une longueur d'environ 30 nm, une largeur de l'ordre de 10 nm et une épaisseur de l'ordre du nanomètre voire moins.

L'on retrouve potentiellement bien entendu, dans les puits de potentiel tridimensionnels que sont les boîtes quantiques (BQ), les propriétés qui ont pu être exploitées dans les puits unidimensionnels ainsi que dans les atomes :

- possibilité d'exciter les électrons donc de les faire “monter” sur un niveau d'énergie excité par absorption de lumière : utilisation des BQ comme photodétecteurs ;
- possibilité d'émission de lumière par désexcitation des électrons : celle-ci peut être spontanée, d'où la possibilité de réaliser des diodes électroluminescentes (qui peuvent même être dopées à l'aide de terres rares pour obtenir une variété de couleurs) ; elle peut aussi être stimulée, d'où la possibilité de réaliser des lasers. L'un des avantages des BQ, outre leurs petites dimensions, est une beaucoup moins grande sensibilité à la température que la plupart des autres dispositifs à semiconducteurs.

Les recherches sur l'information quantique se multiplient de par le monde, en particulier les travaux concernant l'utilisation de boîtes quantiques pour la téléportation d'informations à l'aide d'états intriqués. Les états intriqués sont l'une des manifestations les plus surprenantes de la mécanique quantique. Lorsque deux systèmes sont indépendants (deux boules de pétanque par exemple), une action exercée sur le premier ne modifie pas l'état du second (si je soulève la première boule de pétanque, la seconde reste en place) ; par contre, lorsque ces deux systèmes sont couplés, toute action sur le premier modifie aussi le second (si les boules de pétanque sont liées, en soulevant la première je soulève aussi la seconde) ; l'intrication quantique est un phénomène fondamental de la mécanique quantique mis en évidence par Einstein et Schrödinger dans les années 30 : deux systèmes physiques, comme deux particules, se retrouvent alors dans un état quantique dans lequel ils ne forment plus qu'un seul système, toute mesure sur l'un des systèmes affecte immédiatement l'autre, et ce quelle que soit la distance les séparant. Cette intrication a été mise expérimentalement en évidence sur des couples de photons polarisés par Alain Aspect (4), montrant ainsi que les deux photons couplés ne se comportent pas comme deux particules indépendantes, mais comme un système unique.

Une conséquence est que l'on pourrait avoir sur des objets des actions à distance en manipulant les objets auxquels ils sont couplés, c'est la “téléportation” : tout se passe comme si je pouvais établir un lien invisible entre mes deux boules de pétanque de telle sorte qu'en soulevant l'une, l'autre située à cent mètres de là se soulève toute seule ! Eh bien, des expériences de téléportation d'information ont effectivement pu être réalisées ! Pas sur des boules de pétanque, mais sur des photons. La première démonstration expérimentale effectuée à l'université d'Innsbruck (en Autriche) en 1997, par le groupe de Anton Zeilinger (5), leur confi-

guration permet de téléporter l'état quantique de polarisation à travers une table optique. Très récemment (6), une équipe de physiciens travaillant à l'observatoire de Roque de los Muchachos, sur l'île de La Palma, a réussi à transmettre une clé quantique de cryptographie sur une distance de 144 km : des paires de photons polarisés et intriqués ont été produits à l'observatoire Roque de los Muchachos ; pour chaque paire, un des photons était mesuré sur place alors que son jumeau était transmis à 144 km de là vers la station terrestre optique de Tenerife de l'ESA, utilisée comme récepteur ; une suite aléatoire de nombres définissant une clé pour la cryptographie était alors générée sur le premier photon et transmise instantanément par intrication de façon totalement sûre au second photon qui reproduisait la séquence à 144 km de là ; on notera qu'une telle expérience permet de transporter instantanément de l'information par téléportation entre deux endroits distants, mais n'est pas capable de transporter de la matière.

La téléportation de matière est bien évidemment un sujet fascinant, qui d'ailleurs alimente largement les livres et films de science fiction, à tel point que en 2001 l'armée américaine a mandaté le Dr. Eric W. Davis pour une étude scientifique de la téléportation, étude qui a fait l'objet d'un rapport remis en 2004 (7).

La téléportation d'états quantiques est possible entre deux boîtes quantiques et permet d'envisager son utilisation dans des calculateurs plus rapides que ceux existant actuellement. Cependant un obstacle de taille non seulement à la téléportation mais surtout à la mise en place d'un calcul quantique vraiment performant et capable de traiter une quantité importante d'informations, est celui de la décohérence, la superposition des états quantiques étant rapidement détruite même par de légères interactions avec l'environnement, notamment lorsqu'il s'agit d'interactions thermiques (l'agitation thermique des particules en contact avec le système par exemple). Des progrès sont sans cesse réalisés, et l'on conçoit que cette thématique de recherche soit d'une actualité brûlante (voir ci-dessous le paragraphe "9.5. Qubits et ordinateurs quantiques")

4 – Spintronique

4.1 – Introduction : la notion de spin

La spintronique vient d'être de façon spectaculaire mise sous les projecteurs de l'actualité par l'attribution du prix Nobel de physique 2007 à Albert Fert et Peter Grünberg (figure F4.1) pour avoir découvert en 1988 la magnétorésistance géante.

Plus généralement, cette découverte a ouvert la porte à ce qu'on appelle l'électronique de spin. Dans l'électronique classique, les électrons interviennent essentiellement par l'intermédiaire de leur charge électrique. Dans l'électronique de spin, ou spintronique, c'est une caractéristique des électrons, lié à une grandeur d'origine exclusivement quantique qui est mise en jeu : le spin.

Une particule de masse m décrivant à la vitesse v une circonférence de rayon r est caractérisée par son moment cinétique orbital mvr . Le mouvement d'un point sur la Terre par exemple résulte de la composition de deux mouvements de rotation : le mouvement de rotation de la Terre autour du soleil, caractérisé par le moment cinétique orbital (masse de la Terre multipliée par sa vitesse multipliée par le rayon de l'orbite terrestre), et le mouvement de rotation de la Terre autour de son axe,



Figure F4.1 : Albert Fert (à gauche) et Peter Grünberg (à droite), prix Nobel de physique 2007 (source : <http://www.futura-sciences.com/fr>)

auquel on peut associer un moment cinétique que l'on peut appeler moment cinétique intrinsèque ou moment cinétique de spin. La mécanique quantique conduit à associer à un électron un moment cinétique orbital (lié à la rotation de l'électron en orbite autour du noyau) et un moment cinétique intrinsèque ou moment cinétique de spin, appelé plus brièvement spin. De même que l'énergie d'un électron lié à un atome est quantifiée, de même son moment cinétique orbital est quantifié, ainsi que son spin. La mécanique quantique conduit à attribuer à une particule un spin égal à $sh/2p$ où h est la constante de Planck déjà rencontrée ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ en unités rationalisées Joules x secondes). Le spin s dépend de la particule considérée, pour l'électron il peut prendre les deux valeurs $\pm \frac{1}{2}$.

Par ailleurs une charge électrique tournant autour d'un axe crée une induction magnétique aligné le long de cet axe, par conséquent une particule chargée tel l'électron tournant sur lui-même crée une induction magnétique aligné sur son axe de rotation, de même que le champ magnétique terrestre est engendré par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la Terre. Ainsi l'électron peut être assimilé à un petit aimant (Figure F4.2), qui par rapport à un champ magnétique de référence, peut prendre seulement deux orientations : dans le sens du champ ("spin up") ou dans le sens opposé (spin down). Il faut avoir présent à l'esprit que la représentation de la figure F4.2b de l'électron assimilé à une sphère tournant sur elle-même n'est qu'une image probablement très différente de la réalité, cependant comme indiqué sur cette figure l'électron peut être assimilé à un minuscule aimant produisant un champ magnétique.



Figure F4.2 : (a) une charge électrique positive $+q$ décrivant une spirale d'axe Δ crée une induction magnétique B alignée suivant Δ ; (b) un électron tournant sur son axe crée une induction alignée sur cet axe, il est équivalent à un petit aimant.

Dans un circuit classique, les électrons choisissent leur spin au hasard, si bien que la moitié environ ont un spin positif ou spin up (+ 1/2) et l'autre moitié un spin négatif ou spin down (-1/2). En présence de matériaux magnétiques, il est possible de modifier le spin des électrons et de les contrôler, ce qui permet de leur faire transporter et conserver de l'information. Mais cette action sur le spin ne peut se faire qu'à des échelles très petites, là où se manifestent les effets quantiques, dans des nanostructures. Ceci fut un handicap pour la spintronique dans les années 1980 et 1990, mais c'est aujourd'hui un avantage : cette nouvelle ingénierie devient possible avec les progrès en nanotechnologies et les scientifiques y voient la promesse de circuits encore plus petits, avec des transistors composés de quelques molécules seulement.

L'électronique classique utilise des matériaux (conducteurs, isolants, semi-conducteurs) non magnétiques. La spintronique utilise des matériaux magnétiques, il en résulte des propriétés physiques nouvelles sur lesquelles il est possible de s'appuyer (voir par exemple l'article de J.P. Nozières, du laboratoire "Spintec" commun au CNRS et au CEA (8)) :

- dans un matériau non magnétique, les nombres d'électrons de spin up et de spin down sont à peu près les mêmes. Dans les matériaux magnétiques au contraire, ils sont différents, c'est la raison pour laquelle ils sont magnétiques, c'est en particulier le cas des matériaux usuels (fer, cobalt, nickel...) pour lesquels les électrons mobiles qui transportent le courant sont justement ceux responsables du magnétisme ;
- la résistance électrique d'un matériau conducteur est due aux collisions qui empêchent les électrons d'aller plus vite : collisions contre les impuretés, les défauts, les vibrations des atomes etc. Le mouvement des électrons est tout à fait assimilable à celui d'un paquet de billes roulant le long d'un plan incliné parsemé de clous plantés comme dans un billard : les billes rebondissent sur les clous, ce qui ralentit leur mouvement ; plus la densité de clous est grande, plus il y a de collisions, plus les billes sont ralenties, plus elles sont diffusées. En première approximation, ces collisions ne modifient pas le spin des électrons : on a donc un courant transporté par les électrons de spin up et un courant transporté par les électrons de spin down, ces deux courants "ne se mélangent pas" ;
- lorsqu'un électron subit une collision, il change d'état, ce qui ne peut se réaliser que si le nouvel état est libre. Puisque dans un matériau magnétique le nombre d'électrons (et par conséquent le nombre d'états vides) de spin up et down sont différents, la probabilité de collision des électrons de spin up sera différente de celle des électrons de spin down.

4.2 – Magnétorésistance géante : application aux têtes de lecture de disques durs

La magnétorésistance géante a été découverte en étudiant une alternance de couches de très faible épaisseur (1 à 3 nm) de matériaux ferromagnétiques et non ferromagnétiques : si toutes les couches ferromagnétiques sont aimantées dans le même sens, la résistance électrique est faible, si les magnétisations de deux couches successives sont de sens opposés, la résistance est forte (figure F4.3).

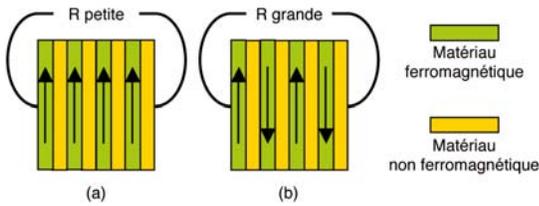


Figure F4.3 : Lorsque les couches ferromagnétiques sont aimantées dans le même sens (a), la résistance électrique est plus faible que lorsqu'elles sont aimantées alternativement dans des sens opposés (b)

Cette magnétorésistance avait déjà été observée, mais Fert et Gruber ont mis en évidence des différences importantes entre les valeurs élevées et les valeurs faibles en utilisant des structures multicouches, d'où le nom de magnétorésistance géante.

Le principe de fonctionnement est le suivant : un matériau aimanté agit comme un "filtre à spin" : les électrons dont le spin est parallèle à l'aimantation circulent aisément (le matériau leur offre une résistance faible), alors que les électrons dont le spin est antiparallèle à l'aimantation sont bloqués (en réalité ils ne sont pas bloqués, mais le matériau leur offre une résistance élevée). Ainsi dans le cas de la figure F4.3.a, tous les électrons de spin vers le haut (ou spin up) passent facilement à travers la multicouche, alors que ceux dont le spin est vers le bas (ou spin down) sont arrêtés : finalement la moitié des électrons passe, la résistance est faible ; on voit qu'il en serait de même si toutes les aimantations des couches étaient orientées vers le bas. Par contre dans le cas de la figure F4.3.b, les électrons de spin vers le haut sont bloqués par les couches aimantées vers le bas, et les électrons de spin vers le bas sont bloqués par les couches aimantées vers le haut, donc tous les électrons sont bloqués, le courant ne peut pas passer (en réalité passe très difficilement), la résistance est élevée.

Des structures plus complexes, appelées vanes de spin, ont été ensuite développées chez IBM afin d'augmenter la sensibilité de l'élément magnétorésistif. La grande résistance induite par de faibles champs magnétiques permet ainsi de détecter, par mesure de résistance, de très faibles champs, et en 1998 sont apparus sur le marché des disques durs dont la capacité a été multipliée par 100 grâce à l'utilisation de la magnétorésistance géante. La capacité de stockage dépasse actuellement 1 Go par cm². Ceci permet en particulier de réaliser des disques durs de la taille d'une pièce de 2 euros utilisables dans les appareils photos numériques et les téléphones mobiles. Cet exemple, tout comme celui cité dans ma conférence précédente⁽¹⁾ concernant l'optique adaptative, montre comment la recherche fondamentale en physique (ou dans d'autres domaines) peut avoir des applications technologiques qui améliorent les conditions de la vie quotidienne.

Le fonctionnement d'une tête de lecture d'un disque dur est schématisé figure F4.4. La piste du disque est constituée d'une succession de domaines chacun à aimantation fixe : chaque domaine dont l'aimantation est orientée vers le haut (en bleu fondé sur la figure F4.4) correspond à un bit égal à 1, chaque domaine orienté vers le bas (en violet sur la figure F4.4) à un bit égal à 0. La tête de lecture est constituée d'une alternance de couches magnétiques, les unes à aimantation fixe (par exemple vers le haut, en vert sur la figure F4.4), les autres à aimantation variable (en bleu sur la figure F4.4), deux couches successives étant séparées par une couche non magnétique (en jaune). Lorsqu'un domaine de la piste à aimantation vers le haut passe sous la tête de lecture, les couches à aimantation variable de la tête de lecture (dessinées en bleu figure F4.4) s'aimantent vers le haut, toutes les aimantations sont

alignées (configuration identique à celle de la figure F4.3.a), la résistance de la tête est faible, l'on reconnaît donc un bit égal à 1. Lorsqu'un domaine aimanté vers le bas passe sous la tête, les couches à aimantation variable de la tête s'aimantent vers le bas, l'on se trouve dans la configuration de la figure F4.3.b, on détecte une résistance élevée, ce qui correspond à un bit égal à 0. Ainsi il est possible de "lire" la succession des bits inscrits sur la piste du disque dur.

Aujourd'hui, la totalité des têtes de lecture/écriture des disques durs (production mondiale de l'ordre de un milliard de têtes par an) est constituée de têtes magnétorésistives du type vanes de spin. En parallèle, le développement de capteurs de champ magnétique ultrasensibles pour l'automobile et l'aéronautique est en plein essor.

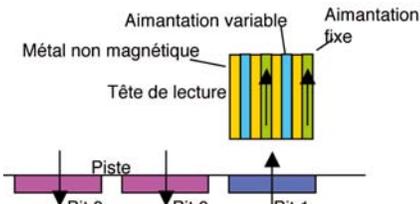


Figure F4.4 : Principe de fonctionnement d'une tête de lecture de disque dur

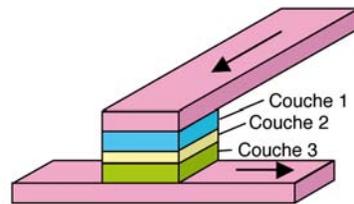


Figure F4.5 : Principe de lecture d'une MRAM : un courant tunnel passe à travers la couche isolante 2, son intensité dépend des sens d'aimantation des couches 1 et 3.

Il me semble important de mettre en valeur les prouesses technologiques qui se cachent derrière des objets d'utilisation maintenant courante tels des disques durs d'ordinateurs, et dont l'existence semble tout à fait naturelle aujourd'hui alors que leurs performances actuelles étaient inenvisageables il y a 10 ou 15 ans seulement et qu'ils n'existaient même pas voici à peine 50 ans. La tête de lecture d'un disque dur "vole" à seulement 10 ou 15 microns au-dessus du disque, séparée de lui par une couche d'air dont la rotation crée un vent d'environ 250 km/h. La firme Seagate, leader mondial de la conception, de la fabrication et de la commercialisation de disques durs, a annoncé en Septembre 2006 la mise au point de disques durs de capacité de stockage de 421 gigabits par pouce carré (soit 67,4 Gb/cm²) ; ceci correspond à une densité de 275 000 pistes par pouce, ce qui signifie une piste (soit la largeur de la piste plus l'intervalle entre deux pistes) tous les 90 nm ; la densité linéaire des informations est de 1,53 Mb/pouce ce qui signifie que un bit utilise sur une piste une longueur de 16,3 nm ! Dans cette communication, la société Seagate prévoit à l'horizon 2009 des capacités de stockage de 40 Go à 275 Go pour les disques de 1 et 1,8 pouces destinés à l'électronique grand public, de 500 Go pour les disques de 2,5 pouces pour ordinateurs portables et de près de 2,5 To (1 To = 1000 Go) pour les disques de 3,5 pouces pour les ordinateurs de bureau et applications d'entreprise. Une capacité de 2,5 To, soit plus de 10 fois la capacité des disques actuels, permettrait de stocker 41 650 heures de musique, ou 800 000 photos numériques, ou 4 000 heures de vidéo numérique, ou 1 250 jeux vidéo ou 2 milliards de pages dactylographiées !

4.3 – Magnétorésistance tunnel : application aux mémoires

Un effet de magnétorésistance similaire à la magnétorésistance géante est la magnétorésistance tunnel, observée dans les jonctions tunnel métal/isolant/métal. Il s'agit d'une structure similaire à celle de la figure F4.4, mais dans laquelle le métal non magnétique (en jaune sur la figure F4.4) est remplacé par une couche d'isolant de quelques atomes d'épaisseur (figure F4.5).

Un tel dispositif peut constituer une MRAM (pour "Magnetic Random Access Memory"). Le point mémoire est constitué par le sens de magnétisation de la couche 1 de la figure F4.5. Dans les mémoires utilisant des semiconducteurs, l'information est stockée sous forme de charges électriques. Dans les MRAM, elle est stockée sous forme d'une direction d'aimantation dans la jonction tunnel magnétique. Le principe est montré figure F4.5 : entre deux électrodes métalliques (en rose sur la figure 4.6), on dispose une couche isolante mince (couche 2 en jaune sur la figure F4.5) prise en sandwich entre deux couches magnétiques 1 et 3 (en vert et en bleu sur la figure F4.5). La couche 3 est un matériau magnétique à aimantation fixe. Une tension électrique est appliquée entre les électrodes : si le courant tunnel qui passe est élevé, cela signifie que la couche 1 est aimantée dans le même sens que la couche 3 (configuration similaire à la figure F4.3.a) ; si le courant est faible, c'est que l'aimantation de la couche 1 est opposée à celle de la couche 3 (configuration de la figure F4.3.b) : on peut ainsi lire l'information stockée en mémoire dans la couche 1. L'écriture, c'est-à-dire le sens d'aimantation de la couche 1 en fonction de l'information qu'on veut y stocker, est plus problématique : elle consiste à faire passer un courant d'électrons polarisés dans la cellule afin de l'aimanter dans le sens du spin des électrons. Cette technologie est actuellement émergente et n'est pas encore commercialisée à grande échelle. Paradoxalement, malgré l'avènement imminent de dispositifs commerciaux, le phénomène de magnétorésistance tunnel, s'il ressemble sur le plan macroscopique à la magnétorésistance géante, est totalement différent sur le plan physique et est encore mal compris : il implique l'asymétrie de spin, mais aussi la structure électronique de l'isolant et notamment de l'interface isolant-métal.

La nature plus stable du magnétisme permet ainsi d'envisager la fabrication de mémoires de faible consommation et qui combinent la rapidité des SRAM (RAM statiques), la haute capacité des DRAM (RAM dynamiques) et le caractère non volatile des mémoires Flash (utilisées par exemple dans les clés USB, mais actuellement trop lentes) : permanentes comme un disque dur et rapides comme les mémoires vives, voilà qui laisse présager un bel avenir aux MRAM. Par ailleurs, ces mémoires MRAM résistent aux effets de rayonnement, une propriété qui intéresse particulièrement les militaires. On commence actuellement à réaliser des circuits utilisant des MRAM, en particulier des circuits multicouches donc tridimensionnels en vue d'augmenter encore considérablement les capacités de stockage.

Les avantages de la spintronique sont nombreux :

- rapidité : les électrons circulent lentement dans les matériaux, alors que les spins se retournent très rapidement, ce qui rend la MRAM près de 1000 fois plus rapide qu'une mémoire de type flash ;
- permanence : le spin d'un électron conserve son orientation quoi qu'il arrive, même dans les collisions de l'électron, et aussi lorsque l'électron ne circule pas, seule la traversée matériau ferromagnétique peut modifier le spin. Ceci permet à la MRAM d'être une mémoire non volatile, contrairement aux mémoires dynamiques actuelles ;

- la taille : les matériaux utilisés pour la manipulation des spins ont des tailles de l'ordre du nanomètre, ce qui permet d'avoir des espaces de stockage considérables dans une taille réduite ;
- la consommation électrique : le spin d'un électron consomme 100 fois moins d'électricité qu'un champ magnétique pour retourner l'aimantation d'un matériau ferromagnétique.

Cependant cette technologie est actuellement émergente, par conséquent sa mise en œuvre est encore incertaine, coûteuse et retourne beaucoup d'erreurs. On estime qu'aux environs des années 2020 l'électronique classique aura atteint les limites permises par la miniaturisation, et que la spintronique aura atteint un stade de maturité qui lui permettra de prendre le relais.

4.4 – Imagerie par résonance magnétique (IRM)

Ce paragraphe a-t-il sa place dans ce texte dédié aux nanotechnologies ? Non pour quiconque a vu un appareil d'imagerie RMN constitué d'un tunnel où peut entrer un corps humain entier, entouré d'énormes bobines supraconductrices où circule un fort courant électrique, refroidies à la température de l'hélium liquide obtenue à l'aide d'imposantes pompes cryogéniques : rien de nanométrique dans tout cela. Cependant, le principe même de cette technique repose sur la propriété exclusivement quantique pour les noyaux des atomes constituant notre corps de posséder un spin. Par ailleurs, ce type d'imagerie ne pourrait pas exister sans la puissance du traitement d'information des ordinateurs modernes dont nous avons vu qu'ils utilisent largement les micro et nanotechnologies.

a) Introduction, historique

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est en réalité l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (RMN), le mot "nucléaire" a été supprimé pour ne pas effrayer le public qui aurait risqué d'assimiler cette technique à des phénomènes liés aux radiations ionisantes.

L'IRM est fondée sur une interaction entre le spin des noyaux atomiques et un champ magnétique extérieur. Tout comme les électrons, les particules constituant le noyau possèdent un spin, responsable d'un moment magnétique : chaque proton (et même aussi chaque neutron) se comporte donc comme un petit aimant dont le mouvement est quantifié. Ce phénomène a été décrit par Felix Bolch et Edward Pucell en 1946 (pris Nobel de physique en 1952). Raymond Vahan Damadian propose dès 1969 d'utiliser la RMN dans un but médical en montrant que la spectroscopie RMN permet la détection de tumeurs. Un pas important est accompli en 1973 : Paul Lauterbur réalise pour la première fois une imagerie RMN en utilisant le principe des gradients et Peter Mansfield introduit en 1977 la technique d'imagerie écho-planaire permettant de capturer de nombreuses images en un temps relativement court. Dans les années qui suivent, la technique évolue rapidement grâce aux progrès réalisés en informatique et en électronique : en 1975 Richard Ernst utilise la transformée de Fourier. Peter Mansfield et Paul Lauterbur obtiennent le prix Nobel de Médecine et physiologie en 2003.

Actuellement l'IRM est une technique puissante d'imagerie de tissus mous. Elle n'est pas bien adaptée à l'étude des tissus osseux.

b) Le phénomène de résonance

La notion de résonance apparaît comme un concept abstrait, c'est pourtant une notion tout à fait familière qu'on utilise et qu'on a mis en pratique sans le savoir (tout comme monsieur Jourdain faisait de la prose) dès l'enfance lorsqu'on fait de la balançoire : lorsqu'un enfant se balance, le système a une fréquence propre (qui dépend de la masse de l'enfant, de la longueur des câbles de la balançoire, de la pesanteur) ; si l'on pousse l'enfant sur sa balançoire avec une fréquence quelconque, c'est-à-dire si l'on donne des impulsions non synchronisées avec le balancement, la balançoire ne bouge pratiquement pas ; mais si l'on donne à la balançoire des poussées avec une période (ou une fréquence) égale à sa période propre d'oscillations, de petites impulsions permettent d'obtenir de grandes amplitudes de déplacement. Autre expérience de résonance que l'on a eu en étant tout petit : en agitant la main de façon quelconque dans une baignoire pleine d'eau, l'on fait de petites vagues, un clapotis ; mais si l'on remue la main même avec une faible amplitude mais à la fréquence propre d'oscillations de l'eau de la baignoire, on produit de grandes vagues et l'eau déborde : les enfants habituellement apprécient beaucoup cette expérience, les parents moins. La résonance est utilisée par exemple dans la réception des ondes radio ou télé : on accorde un circuit à la fréquence d'émission de la station que l'on souhaite capter, ce qui déclenche un signal d'amplitude importante que l'on détecte aisément, alors que les signaux des autres stations, qui émettent à des fréquences non accordées au circuit, ne sont pas détectées car elles produisent un signal trop faible. On peut qualifier le phénomène de résonance par le concept : "petites causes, grands effets".

Ce phénomène de résonance n'est d'ailleurs pas spécifique aux sciences, il se produit aussi dans la société : de tous temps et en tous lieux, existent et ont existé des groupuscules d'agitateurs et de fanatiques, qui par leurs actes extrémistes créent des troubles, des perturbations, qui dérangent ponctuellement l'ordre social ; mais lorsque les idéologies défendues par ces groupuscules, pour des raisons religieuses, économiques, sociales ou idéologiques, trouvent une résonance dans la population, les mêmes agissements qui en temps "normal" créent des troubles de l'ordre public se muent alors en mouvements de grande ampleur, voire en révolutions, qui balaient tout sur leur passage.

c) Le proton dans une induction magnétique uniforme B_0 :

Parmi les matériaux possédant un spin, l'hydrogène joue un rôle important car il entre en particulier dans la composition de l'eau, c'est par conséquent un élément abondant dans le corps humain, et en pratique c'est au noyau de l'hydrogène, constitué d'un seul proton, qu'on applique la RMN en imagerie médicale. On plonge pour cela le corps à étudier dans une induction magnétique (nous dirons par la suite un champ magnétique : cette dénomination est impropre mais communément admise par le public) fixe B_0 d'intensité B_0 de l'ordre de 1 à 3 T (T est le symbole du Tesla, unité de champ magnétique ; à titre d'exemple, l'intensité du champ magnétique terrestre est de l'ordre de 50 μ T (micro Tesla), un tesla représente donc 20 000 fois l'intensité du champ magnétique terrestre).

Lorsqu'on applique un champ magnétique fixe B_0 , par exemple dans la direction Oz, contrairement à l'aimant (la boussole par exemple) qui s'aligne le long de B_0 , le moment magnétique μ du proton, dont les états sont quantifiés, ne s'aligne pas le long de B_0 . Chacun a joué à la toupie et s'est aperçu que, lorsqu'on lance une

toupie en la faisant tourner suivant un axe oblique, son axe de rotation tourne autour d'un axe vertical supporté par la force de pesanteur : ce mouvement s'appelle la précession. Exactement de la même manière, à cause de la rotation du proton sur lui-même, le moment magnétique μ du proton de spin $+1/2$ ne s'aligne pas rigoureusement le long de \mathbf{B}_0 , mais tourne autour de \mathbf{B}_0 , à une vitesse de rotation ω_0 , proportionnelle à B_0 : $\omega_0 = \gamma B_0$ (9.1)

où γ est le rapport gyromagnétique, caractéristique du matériau. Pour le proton, la fréquence de précession $f_0 = \omega_0/(2\pi)$ vaut 42,57 MHz (méga hertz) lorsque B_0 vaut un Tesla. Cela signifie le moment magnétique du proton, c'est-à-dire son "axe de rotation", tourne autour de \mathbf{B}_0 à la vitesse de 42,57 millions de tours par seconde !

d) Acquisition d'une image RMN :

L'acquisition d'une image RMN s'effectue essentiellement en trois étapes.

Première étape : immersion dans un champ magnétique fixe \mathbf{B}_0 :

On plonge le patient dans une induction magnétique \mathbf{B}_0 . Les protons des atomes d'hydrogène contenus dans les molécules d'eau de son corps ont chacun un spin. Comment réagissent-ils ?

EXPLICATION SEMI-CLASSIQUE :

Les protons de spin $+1/2$ s'alignent près de la direction \mathbf{B}_0 , ceux de spin $-1/2$ dans la direction opposée, tous tournent d'un mouvement de précessions de pulsation ω_0 (figure F4.6). Avant application du champ \mathbf{B}_0 , il y avait autant des protons de spin $+1/2$ que $-1/2$, on peut donc penser que dans le champ \mathbf{B}_0 , autant de protons vont s'aligner vers le haut que vers le bas. En fait ce n'est pas tout à fait exact, parce que l'énergie des protons à spin parallèle est un peu inférieure (donc correspond à un état plus stable) à celle des protons à spin antiparallèle : le système ayant tendance à occuper l'état le plus stable, il y aura un peu plus de protons en alignement parallèle qu'en alignement antiparallèle. La différence est petite, seulement deux millièmes : elle va cependant permettre de réaliser l'imagerie par RMN. La somme des

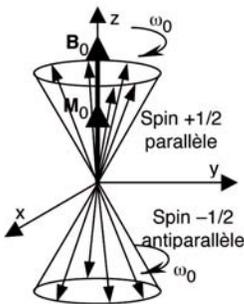


Figure F4.6 : Mouvement des moments magnétiques de spin des protons dans un champ fixe \mathbf{B}_0 : "photographie" à un instant donné, chaque flèche représente le moment magnétique μ d'un proton.

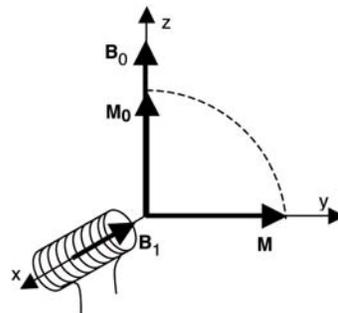


Figure F4.7 : Aimantation résultante \mathbf{M} à la fin de l'impulsion radio-fréquence \mathbf{B}_1 .

aimantations des spins parallèles a une résultante alignée le long de \mathbf{B}_0 , il n'y a pas de composante perpendiculaire car les phases des différents moments $\boldsymbol{\mu}$ sont aléatoires et se compensent, d'ailleurs la figure F4.6 montre qu'il y a symétrie de révolution autour de \mathbf{B}_0 , il n'y a par conséquent aucune raison d'avoir une composante perpendiculaire à \mathbf{B}_0 . De même la somme des aimantations des spins antiparallèles a une résultante alignée le long de \mathbf{B}_0 , mais dans le sens opposé. Etant donné qu'il y a un peu plus d'atomes de spin parallèle que de spin antiparallèle, la somme de ces deux résultantes n'est pas nulle, elle est dirigée dans le sens de \mathbf{B}_0 , et sa valeur \mathbf{M}_0 (voir figure F4.6) est évidemment proportionnelle au nombre de protons présents. Cependant, contrairement à ce que pourrait laisser croire la figure F4.6, \mathbf{M}_0 est faible, noyé dans \mathbf{B}_0 et par conséquent non mesurable : c'est comme si l'on voulait mesurer l'intensité du faisceau d'une lampe de poche qui s'ajoute au phare d'une voiture : pour détecter la lampe de poche, on va diriger son faisceau perpendiculairement à la direction du phare de la voiture.

EXPLICATION QUANTIQUE :

En l'absence de champ, les protons de spin $+1/2$ et de spin $-1/2$ sont dans deux états différents mais ont la même énergie, on dit que les deux états sont dégénérés. L'application du champ extérieur \mathbf{B}_0 "lève la dégénérescence", c'est-à-dire confère à ces deux états des énergies différentes.

Le principe de la "levée de dégénérescence" est très facile à comprendre. Imaginons deux embarcations à moteur se déplaçant sur un canal, à la même vitesse et dans des sens opposés. Si l'eau du canal est immobile, les deux embarcations sont dans des états différents, puisque leurs vitesses sont différentes, mais leurs énergies $(1/2)m v^2$ sont les mêmes. Si au contraire l'eau circule dans le canal, le courant allant de gauche à droite, à la vitesse V :

- l'embarcation qui se déplace vers la droite est entraînée par le courant, elle va plus vite, sa vitesse est $v + V$, son énergie est donc plus grande, elle vaut $E_1 = (1/2) m (v + V)^2 = (1/2) m (v^2 + 2 v V + V^2)$,
- l'embarcation qui se déplace vers la gauche, donc à contre courant, est ralentie par le courant, elle va moins vite, sa vitesse est $v - V$, son énergie est donc plus petite, elle vaut $E_2 = (1/2) m (v - V)^2 = (1/2) m (v^2 - 2 v V + V^2)$,

on voit que le champ (ici le courant d'eau) extérieur a levé la dégénérescence, les deux états différents ont maintenant des énergies différentes, et la différence d'énergie vaut : $E_1 - E_2 = (1/2) m 4 v V$: la différence d'énergie est proportionnelle à l'intensité du champ extérieur, ici proportionnelle à la vitesse V du courant d'eau.

Il en est exactement de même pour les spins du proton :

- les protons de spin $-1/2$ antiparallèles ont une énergie plus élevée :

$$E_1 = + (1/2) \gamma (h / 2 \pi) B_0,$$

- les protons de spin $+1/2$ parallèles ont une énergie plus basse:

$$E_2 = - (1/2) \gamma (h / 2 \pi) B_0.$$

$$\text{La différence d'énergies vaut : } E_1 - E_2 = + \gamma (h / 2 \pi) B_0 \quad (9.2)$$

La figure F4.8 montre les deux niveaux d'énergie des spins des protons. Le niveau de plus basse énergie est plus peuplé à l'équilibre.

Seconde étape : application d'une impulsion radio-fréquence $B_1 \sin(\omega_0 t)$:

La seconde étape consiste à faire basculer l'aimantation résultante \mathbf{M}_0 , qu'on veut mesurer, dans une direction perpendiculaire à \mathbf{B}_0 . Pour cela, on superpose au champ fixe \mathbf{B}_0 un champ sinusoïdal $\mathbf{B}_1 \sin(\omega_0 t)$ de direction perpendiculaire à \mathbf{B}_0 , par exemple aligné suivant l'axe Ox , et oscillant à la fréquence de résonance ω_0 . Ce champ est créé en envoyant un courant sinusoïdal à cette fréquence dans une bobine d'axe Ox .

EXPLICATION SEMI-CLASSIQUE :

Sous l'effet de ce champ et à cause du fait qu'il est appliqué à la fréquence de résonance ω_0 , l'aimantation des protons initialement en \mathbf{M}_0 bascule autour de Ox , et tourne d'un angle qui dépend de l'énergie appliquée, c'est-à-dire de l'intensité du champ \mathbf{B}_1 et du temps pendant lequel on l'applique. Il est possible de déterminer ces deux paramètres de façon à ce que l'aimantation tourne de 90° , on arrête alors l'application de \mathbf{B}_1 : pour cette raison, on dit que \mathbf{B}_1 est une impulsion radio-fréquence (car la fréquence $f_0 = \omega_0 / (2\pi)$ se situe dans la bande des fréquences radio). L'on est alors dans la situation représentée figure F4.7 : l'aimantation résultante a la position \mathbf{M} alignée le long de l'axe Oy . On peut aussi arrêter l'impulsion radio-fréquence lorsque l'aimantation a basculé de 180° au lieu de 90° .

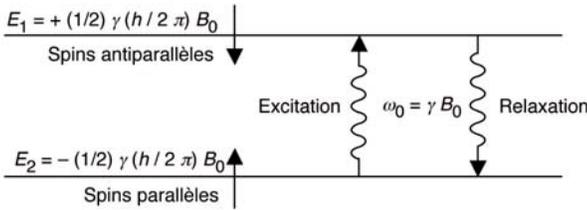


Figure F4.8 : Niveaux d'énergie des spins des protons dans le champ B_0 ; l'excitation et la relaxation se font à la fréquence ν_0 telle que : $E_1 - E_2 = h \nu$ soit $\omega_0 = \gamma B_0$.

EXPLICATION QUANTIQUE :

L'excitation (impulsion radio fréquence) consiste à amener des spins du niveau bas E_1 vers le niveau haut E_2 , ce qui implique l'absorption d'un photon de fréquence ν telle que : $h \nu = E_1 - E_2$ c'est-à-dire d'après l'équation (9.2) : $h \nu = \gamma (h / 2\pi) B_0$ soit $\nu = (\gamma / 2\pi) B_0$ correspondant à une pulsation $\omega = 2\pi \nu = \gamma B_0$ soit justement (voir relation (9.1) la pulsation de résonance ω_0 . Ce photon est le rayonnement électromagnétique émis par la bobine, c'est-à-dire l'impulsion radio fréquence. Le basculement de 90° de l'aimantation correspond à une excitation telle que les populations des deux niveaux E_1 et E_2 soient égales ; le basculement à 180° correspond à une inversion des populations entre E_1 et E_2 par rapport à l'état d'équilibre.

Troisième étape : retour à l'équilibre, acquisition du signal IRM :

Lorsque l'aimantation a atteint la position horizontale alignée le long de l'axe Oy , on supprime l'impulsion radiofréquence \mathbf{B}_1 , il s'ensuit que le système revient à l'équilibre, et l'on mesure ce retour à l'équilibre (relaxation des protons) : l'aimantation des protons va, à partir de la position perturbée \mathbf{M} , revenir à la position d'équilibre \mathbf{M}_0 en décrivant une trajectoire complexe schématisée figure F4.9a. La même bobine qui a servi à appliquer le champ \mathbf{B}_1 sert maintenant à recueillir le signal RMN de relaxation : en effet, l'aimant \mathbf{M} dont l'orientation varie devant la bobine

induit dans celle-ci un courant, de la même façon que l'aimant d'un alternateur tournant devant ses bobines induit un courant. Ce courant dans la bobine est un signal oscillatoire amorti (figure F4.9b). On calcule la transformée de Fourier de ce signal, elle se présente sous la forme d'un pic dont la fréquence centrale est la fréquence de résonance $f_0 = \omega_0 / (2\pi)$ et dont la largeur à mi hauteur vaut $1 / (4\pi\tau)$ où τ est la constante de temps d'amortissement.

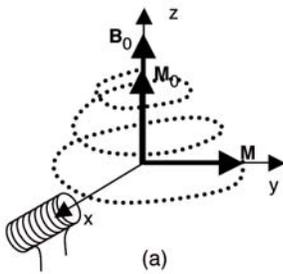
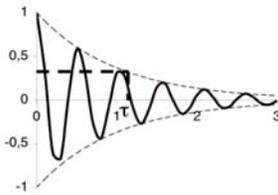
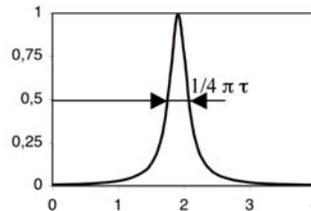


Figure F4.9 : Relaxation de l'aimantation après impulsion radio-fréquence. (a) Retour à l'équilibre de l'aimantation M vers sa position initiale M_0 ; (b) Amplitude de M fonction du temps : signal RMN oscillatoire amorti avec un temps de relaxation τ (ici, $\tau = 1$) ; (c) Transformée de Fourier du signal en fonction de la fréquence : le pic est centré sur la fréquence de résonance, la largeur à mi-hauteur vaut $1/(4\pi\tau)$



(b)



(c)

Du point de vue quantique, le retour à l'équilibre (relaxation) correspond au retour des spins de l'état d'énergie E_1 à l'état E_2 ce qui se fait par émission d'un photon à la même pulsation ω_0 : ce rayonnement électromagnétique est capté par la bobine qui est parcourue par un courant du type de celui représenté figure F4.9b.

Paramètres de caractérisation

La pulsation de résonance est proportionnelle au champ extérieur B_0 . On utilise cette propriété pour localiser le signal afin de réaliser une imagerie. Pour cela, on ajoute à B_0 un champ qui varie dans l'espace, de quelques pour cents par mètre, à l'aide de "bobines de gradient de champ". Ainsi en chaque point règne un champ magnétique différent, il y correspond donc une fréquence de résonance différente. La mesure de la fréquence de résonance, aisée sur la transformée de Fourier du signal (voir figure F4.9c), permet alors de déterminer la valeur du champ magnétique et donc de localiser la zone qui a produit ce signal. On peut ainsi analyser un volume donné tranche par tranche, puis reconstituer le corps en trois dimensions grâce aux puissantes techniques de traitement de signal mises au point ces dernières années (figure F4.10).

L'intensité de l'aimantation M_0 , c'est-à-dire l'intensité du signal RMN qui se traduit par la surface sous la raie de résonance de la transformée de Fourier, est directement proportionnelle au nombre d'atomes d'hydrogène, il est possible de réaliser une analyse quantitative.

Un même noyau atomique placé dans un champ externe B_0 peut résonner à des fréquences légèrement différentes selon sa place sur une molécule et les liaisons chimiques dans lesquelles il est engagé car le champ auquel il est soumis est la somme de B_0 et des champs locaux liés en particulier au moment magnétique créés par les électrons sur leurs orbites, il vaut donc B^0 , par conséquent la fréquence de résonance n'est pas ω_0 mais w^0 . Le décalage $d = (\omega^0 - \omega_0) / \omega_0$ est le déplacement chimique. Par exemple, le déplacement chimique entre les hydrogènes des graisses sur les radicaux CH_2 CH_3 et les hydrogènes de l'eau est de l'ordre de 4×10^{-6} . Ce décalage ne peut être observé que si le champ principal est homogène à mieux que 10^{-6} . L'existence de ce petit déplacement chimique sera mise à profit dans les séquences de suppression de graisse, qui visent justement à supprimer la résonance des hydrogènes qui ne sont pas ceux de l'eau et bien sur aussi dans toutes les techniques de spectroscopie RMN.

La relaxation du signal correspond au retour de l'aimantation M d'une position alignée sur Oy à sa position d'équilibre M_0 . Pendant ce retour à l'équilibre, le vecteur M se déplace de façon compliquée (voir figure F4.9a), et ce vecteur peut être décomposé en une composante longitudinale $M_{//}$ sur l'axe Oz (= projection de M sur l'axe Oz) et une composante transversale M_T (= projection de M sur le plan xOy) :

- à la composante longitudinale $M_{//}$ correspond un temps de relaxation T_1 qui dépend de la mobilité des atomes d'hydrogène, il est d'autant plus court que ces atomes sont liés à de grosses molécules : par exemple T_1 vaut 3 secondes pour l'au pure, 1 à 2 secondes pour l'eau en solution, 0,5 seconde dans les tissus : la mesure de ce temps permet donc d'avoir des indications sur la quantité d'eau libre par rapport à l'au "liée", par exemple de déceler un œdème.
- à la composante transversale M_T correspond un temps de relaxation T_2 toujours inférieur à T_1 .

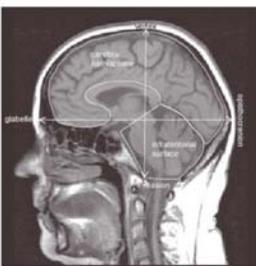


Figure F4.10 : Image IRM d'une tête humaine en coupe sagittale (source : <http://www.ivry.cnrs.fr/deh/guihard/dim.fr>)

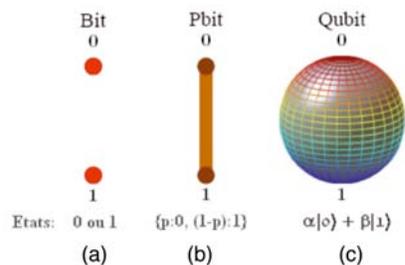


Figure F4.11 : représentations d'un bit, d'un pbit, d'un qubit (sphère de Bloch)

4.5 – Qubit et ordinateurs quantiques

a) Qubit :

La figure F4.11 représente trois types de bits.

Figure F4.11.a : le bit à proprement parler : les ordinateurs actuels utilisent des bits. Un bit peut prendre la valeur 0 ou 1, il est physiquement réalisé par un système qui peut se présenter seulement sous deux états, on attribue la valeur 0 à l'un de ces états et la valeur 1 à l'autre, par exemple : le courant passe ou ne passe pas, le transistor est bloqué ou saturé, le spin de l'électron est vers le haut ou vers le bas. Avec un bit, on peut stocker deux valeurs : 0 ou 1.

Figure F4.11.b : le pbit est un "bit probabiliste", il a la probabilité p d'être dans l'état 0 et $1-p$ d'être dans l'état 1, c'est l'exemple typique de la pièce de monnaie qu'on jette en l'air et qui a la probabilité 0,5 de retomber sur le côté pile, et 0,5 sur le côté face. On peut l'imaginer dans une boîte noire, on ne connaît pas son état, on ne peut le connaître que lorsqu'elle retombe par terre, alors on observe 0 ou 1 selon qu'elle retombe sur pile ou face. Si l'on fait plusieurs expériences, on obtient des résultats différents, et l'on ne pourra se faire une idée de la valeur de p (ici $p = 0,5$) qu'après avoir réalisé un grand nombre d'expériences.

Figure F4.11.c : c'est la représentation d'un "Quantum bit" ou Qubit (parfois dénommé Qbit). Un Qubit est représenté par un système quantique que l'on peut aussi observer sous deux états seulement que nous pourrions aussi comme précédemment noter 0 et 1, qui en fait sont notés $|0\rangle$ et $|1\rangle$ pour les distinguer des nombres 0 et 1, et qui sont les deux pôles de la sphère de Bloch de la figure F4.11.c. La mécanique quantique nous enseigne qu'un tel système peut se trouver non seulement dans l'un ou l'autre des états $|0\rangle$ ou $|1\rangle$, mais aussi dans un état $|\psi\rangle$ qui est une combinaison linéaire quelconque de $|0\rangle$ et $|1\rangle$, c'est-à-dire dans un état $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ où α et β sont des nombres complexes tels que $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. La mécanique quantique nous enseigne en outre que si ce système est dans un tel état $|\psi\rangle$ et si l'on réalise une mesure sur ce système, l'on ne trouvera pas le résultat $|\psi\rangle$! On trouvera soit le résultat $|0\rangle$ soit le résultat $|1\rangle$: la probabilité de trouver le résultat $|0\rangle$ vaut $|\alpha|^2$, et celle de trouver le résultat $|1\rangle$ vaut $|\beta|^2$. En d'autres termes, le seul fait d'effectuer une mesure perturbe l'état du système et le force à se positionner dans un état observable, en général différent de celui que l'on cherche à mesurer. Ainsi, si l'on fait deux mesures successives sur un système dans le même état, on risque fort de trouver deux résultats différents.

Cet aspect intrinsèquement probabiliste de la mécanique quantique est totalement en contradiction avec le déterminisme qui est le fondement de la science classique, qui justifie son existence même sur le postulat que si l'on répète une mesure à deux instants différents sur le même système dans les mêmes conditions on doit trouver le même résultat. Ce postulat n'est pas vrai en mécanique quantique : si par exemple l'on mesure un grand nombre de fois l'état du système lorsque celui-ci est dans l'état $|\psi\rangle = 0,6|0\rangle + 0,8|1\rangle$, l'on trouvera le résultat $|0\rangle$ avec la probabilité $0,6^2 = 0,36$ c'est-à-dire dans 36 % des cas, et le résultat $|1\rangle$ avec la probabilité $0,8^2 = 0,64$ c'est-à-dire dans 64 % des cas. Ce postulat probabiliste de la mécanique quantique ainsi que le principe d'incertitude qui stipule que certaines quantités (vitesse et position par exemple) ne peuvent pas être observées simultanément avec une précision infinie, sont tout à fait déroutants et ont suscité dans la première moitié du 20ème siècle d'importantes controverses entre physiciens. Bien qu'Einstein ait par

ses travaux largement participé à l'avènement de la mécanique quantique, il était en profond désaccord avec Schödinger et disait "Dieu ne joue pas aux dés" ou encore " Le hasard, c'est Dieu qui se promène incognito".

b) Principe d'un ordinateur quantique

Un ordinateur classique utilise des bits, un ordinateur quantique utilise des Qubits : on voit de suite qu'un tel ordinateur possède une capacité mémoire bien supérieure puisqu'il peut travailler et faire les calculs non seulement en utilisant les valeurs 0 et 1, mais aussi avec toutes les combinaisons de ces deux états.

Par exemple, nous avons vu que le spin d'un électron pouvait "prendre" deux états : spin up et spin down : en réalité, il aurait fallu dire que l'on pouvait "observer" ces deux états, le spin peut en fait se trouver dans une quelconque combinaison (complexe) de ces deux états. Dans les paragraphes précédents (magnétorésistance géante, MRAM...), le spin a été utilisé comme dans un ordinateur classique, car par le biais d'un champ magnétique extérieur on l'a forcé à se trouver dans l'un ou l'autre de ces deux états observables. Un ordinateur quantique utilisant le spin d'un électron comme support physique utiliserait toutes les combinaisons possibles de ces états...tant que l'on ne fait aucune mesure, c'est-à-dire tant qu'on ne cherche pas à savoir dans quel état il se trouve en cours de calcul : si on le fait, on modifie l'état du Qubit, le spin prend soit la valeur spin up soit la valeur spin down, il change d'état, l'ordinateur voit ses paramètres ainsi modifiés en cours de calcul, toute la suite du calcul est faussée. Ainsi un ordinateur quantique est une "boîte noire" à l'intérieur de laquelle on ne peut pas intervenir : on entre des données, la boîte noire se débrouille pour effectuer des calculs, et il en sort un résultat ; si l'on tente d'intervenir pour observer des résultats intermédiaires, on modifie son état, on fausse les calculs et donc le résultat final.

Bien évidemment, de même qu'un ordinateur classique n'utilise pas un seul bit mais un grand nombre de bits (nous avons évoqué plus haut des gigabits et même des térabits), un ordinateur quantique utilisera un grand nombre de Qubits. De même que le déroulement des calculs dans un ordinateur classique relie nécessairement entre eux les différents bits, de même dans un ordinateur quantique les Qubits seront liés entre eux, ce qui signifie que les états des différents Qubits de l'ordinateur seront intriqués. On a déjà parlé de l'intrication des états quantiques en évoquant les expériences de téléportation, et nous avons signalé à ce propos la nécessité d'isoler totalement le système intriqué de l'extérieur afin de ne pas risquer une quelconque décohérence. On retrouve ici encore la nécessité que l'ordinateur quantique soit rigoureusement isolé de l'extérieur tout le temps que durent les calculs qu'on lui fait faire.

On voit donc qu'un ordinateur quantique possède peu d'entrées et peu de sorties, il ne présente donc d'intérêt que dans les calculs à relativement peu de paramètres mais impliquant une combinatoire complexe.

c) Algorithmes quantiques

On peut s'étonner de la rapidité avec laquelle évoluent les logiciels, où chaque année voire plusieurs fois par an sortent de nouvelles versions. Au delà d'améliorations souvent mineures d'une version à l'autre, l'aspect commercial n'est pas

étranger à cette évolution : le document écrit avec la dernière version de traitement de texte n'est pas toujours lu par la version précédents, ce qui pousse bien entendu à l'achat de la dernière version... Mais il y a aussi un aspect plus fondamental : un logiciel écrit pour une ancienne architecture d'ordinateur ne tire pas partie des progrès d'une nouvelle architecture, et l'on sait que les ordinateurs eux-mêmes évoluent vite ! Par exemple si un calcul de multiplication est programmé sur un ordinateur supportant un encodage sur 8 bits, à vitesse identique il n'ira pas plus vite si ce calcul est exécuté sur une plate-forme 32-bits. Pour obtenir le résultat plus rapidement il faut recompiler le programme pour la nouvelle plate-forme afin de tirer avantage des nouvelles opérations sur 32-bits.

La logique des ordinateurs quantiques permet de nouvelles opérations que n'autorise pas la logique classique. De nouveaux algorithmes tirant parti de ces possibilités ont ainsi été imaginés pour les ordinateurs quantiques.

– un premier type d'algorithmes imaginés concerne la factorisation d'un nombre, c'est-à-dire sa décomposition en produit de facteurs : exemple : 7425 peut se factoriser de nombreuses manières, parmi lesquelles 135×55 ou 25×297 ; une des factorisations est la décomposition en nombres premiers : $7425 = 3^3 \times 5^2 \times 11$. Ce problème revêt une grande importance en mathématiques, en théorie de la complexité, et en cryptologie. Peter Shor a découvert en 1994 un algorithme quantique qui pour effectuer la décomposition d'un nombre à n bits nécessite un nombre de calculs de l'ordre de n^3 avec un ordinateur quantique à $2n$ Qubits au lieu de e^n avec un ordinateur classique. Ainsi pour factoriser un nombre de 30 bits, un ordinateur quantique de 60 bits mettrait 1 seconde pour calculer ce qu'un ordinateur classique calculerait en 12,5 ans ! Cela signifie que si l'on était capable de construire (ce qui n'est pas assuré) de grands ordinateurs quantiques (plus de 256 qubits) ceux-ci seraient capables de résoudre des problèmes de décryptage et d'accès à l'information plus vite que tout ordinateur classique : le pays ou l'organisation qui posséderait un tel ordinateur pourrait décrypter n'importe quel code existant actuellement, aucune communication ne serait protégée ! On voit tout l'intérêt stratégique d'une telle machine.

– les ordinateurs quantiques pourraient être utilisés pour des simulations de mécanique quantique. C'est la raison pour laquelle on les avait imaginés au départ. L'accélération pourrait être aussi grande qu'avec la factorisation. Ce serait d'un grand bénéfice pratique pour beaucoup de physiciens, car les calculs quantiques deviennent extrêmement complexes dès qu'on sort de quelques cas triviaux.

– enfin l'on a démontré la possibilité d'effectuer des recherches rapides dans des bases de données importantes : normalement, il faut $N/2$ recherches pour trouver un enregistrement dans une base de données contenant N entrées. L'algorithme quantique de Lov Grover trouve la donnée en un temps \sqrt{N} . Ainsi l'algorithme de Grover fait gagner un temps d'un facteur 10 pour la recherche dans une base de données de seulement 400 entrées, un facteur 100 pour une base de 40 000 entrées, tous autres paramètres égaux.

Un ordinateur quantique de 100 qubits serait capable de traiter l'équivalent de 1019 bits d'information soit, en jargon informatique l'équivalent d'une puissance de 10 000 Teraflops ! Avec 300 qubits on estime disposer de plus d'états quantiques qu'il n'y a d'atomes dans tout l'Univers, ce qui permettrait de simuler le Big Bang...

d) Réalisations

Dans les années 1970 et 1980, les ordinateurs quantiques naissent dans l'esprit de physiciens tels le prix Nobel 1965 Richard Feynman pour résoudre des problèmes de mécanique quantique. En 1994 Peter Shor construit un algorithme pour factoriser les grands nombres, ce qui débloque les crédits de recherche... En 1996 est inventé par Lov Grover un algorithme de recherche dans des bases de données, mais c'est en 1998 que IBM présente le premier ordinateur quantique de 2 Qubits, puis en 2001 IBM crée un ordinateur à 7 Qubits et grâce à l'algorithme de Shor parvient à factoriser... le nombre 15 !

Plusieurs pistes sont explorées pour réaliser des ordinateurs quantiques :

- électron piégé dans une boîte quantique : une boîte quantique (voir paragraphe 3.3) peut être suffisamment petite (c'est alors un "point quantique", en anglais "quantum dot") pour y piéger un électron, qui au repos dans son état fondamental représente un bit 0. On peut faire passer cet électron dans un état excité (bit 1) au moyen d'une impulsion laser de fréquence et de durée adaptées. Une nouvelle impulsion laser peut le ramener dans son état fondamental. Si l'impulsion laser est moitié moins longue que la durée nécessaire faire passer l'électron dans l'état excité, l'électron passe dans une superposition d'états fondamentaux et excité simultanément : cela correspond à l'état d'intrication quantique du qubit. Des fonctions logiques plus complexes peuvent être créées en utilisant des points quantiques arrangés par paires.
- utilisation de la RMN : la RMN (voir paragraphe 4.4) peut être utilisée dans des matériaux solides, liquides ou gazeux. Un ordinateur quantique utilisant la RMN peut être réduit à une molécule et ces qubits sont représentés par les noyaux atomiques contenus dans la molécule. En fait pour effectuer les calculs le système n'utilise pas une seule molécule mais une certaine quantité de matière : l'équipe d'Isaac Chuang et Costantino Yannoni de IBM a utilisé un liquide. L'avantage de cette méthode est d'éviter tout risque d'erreur : même si les molécules du liquide sautent dans un autre état, l'état de spin des noyaux qu'elles contiennent reste inchangé. Le problème de la décohérence reste toutefois présent, mais il apparaît beaucoup plus tard que dans toute autre technique entrevue jusqu'à présent. C'est cette équipe qui en 1998 a créé un ordinateur quantique à 2 qubits dans un dé à coudre de chloroforme et parvint à calculer les différentes périodicités d'une fonction ; c'est elle aussi qui est parvenue à créer un système contenant 7 qubits qui leur permet de réaliser la factorisation du nombre 15 grâce à l'algorithme de Shor. En pratique cela correspond à contrôler un milliard de milliards de molécules ! Chuang et Gershenfield n'envisagent toutefois pas de solutions au delà de 15 ou 20 qubits du fait que les signaux magnétiques qui mesurent l'orientation des spins et déterminent les états quantiques deviennent excessivement faibles à mesure que le nombre de qubits augmentent, faiblissant d'un facteur voisin de 2 pour chaque qubit supplémentaire.
- les semiconducteurs : Voyant les limites de la RMN, Colin Williams du Jet Propulsion Laboratory de la NASA a suggéré de fixer les qubits dans des semiconducteurs ou sur des photons piégés dans des cavités optiques, telles que les boîtes quantiques. On peut utiliser des électrons confinés dans des nanostructures semi-conductrices, ou encore des noyaux associés avec des impuretés monoatomiques dans un semi-conducteur ou encore des flux électroniques ou magnétiques circulant dans des supra-conducteurs.

Un aspect important est lié au fait que les problèmes auxquels nous faisons face aujourd'hui sont considérés comme des problèmes techniques plutôt que fondamentaux, on espère donc être en mesure de les résoudre d'ici quelques dizaine d'années.

En Février 2007, la société D-Wave annonce avoir réalisé un ordinateur quantique de 16 Qubits à état solide, dénommé Orion, et promet un ordinateur à 32 Qubits pour la fin de l'année et 1024 Qubits un an plus tard, mais il est difficile de faire la part de la réalité et de l'intoxication... L'on sait déjà qu'Orion possède un processeur, refroidi à la température de l'hélium liquide, qui comporte une grille de 16 qubits, chacun étant relié à ses voisins immédiats, horizontalement, verticalement ou en diagonale : ceci n'en fait pas un vrai ordinateur quantique, car dans une telle machine, chaque qubit est relié à tous les autres.

L'ordinateur quantique : rêve il y a 15 ans, embryon de réalisation aujourd'hui, réalité demain, c'est-à-dire dans quelques dizaines d'années ?

5 – Conclusion

Les différents aspects développés dans la présente conférence ne peuvent que conforter les éléments qui se dégageaient déjà de ma conférence précédente (1), de sorte que les conclusions qui y figurent restent tout à fait d'actualité :

- accélération des progrès scientifiques et technologiques,
- capacité de l'homme à créer des structures totalement artificielles de dimensions nanométriques,
- interdépendance entre la recherche fondamentale et les applications,
- nécessité de développer l'interdisciplinarité,
- importance des enjeux économiques et sociétaux des nanotechnologies,
- nécessité de soutenir un effort de recherche important, ce qui compte tenu des enjeux et des coûts ne peut se faire qu'à une échelle internationale.

Si les nanosciences sont nées il y a plus de 30 ans, l'essor des nanotechnologies est très récent, 10 ans à peine. Las de voir les crédits de recherche partir vers la génomique, des américains lancent l'ambitieux projet NNI (National Nanotechnology Initiative) appuyé par les grandes agences gouvernementales (NSF : National Science Foundation ; NIH : National Institute of Health), cité par le président Clinton dans son discours sur l'état de l'Union de Janvier 2000, puis relayé avec un peu de retard comme d'habitude par le ministère français de la recherche qui lance un programme sur les nanosciences dont le budget d'équipement atteint 60 M€ en 2007.

L'effort mondial public et privé en 2007, en budget consolidé, est de l'ordre de 10 G\$, dont la moitié en recherche publique, soit 5 G\$ partagé en quatre parts égales entre les USA, l'UE, le Japon et le reste du monde ; l'autre moitié, soit 5 G\$ de recherche industrielle, est beaucoup plus importante aux USA et en Asie.

Les économistes envisagent pour la production de nano objets à l'horizon 2015 un marché mondial de 1000 G\$ et 2 millions d'emplois.

Les progrès considérables de la microélectronique (loi de Moore) offrent dès aujourd'hui d'énormes capacités de calcul (traitement de l'information et mémorisation). Les matériaux nanostructurés (insertion de nanotubes et de nanoparticules dans des matrices) offrent des perspectives nouvelles pour de nombreuses applications. En biologie, une véritable instrumentation à l'échelle nanométrique voit le jour avec la manipulation de macromolécules biologiques. En médecine, la vectorisation de nanoparticules dotées de fonctionnalités physiques ou chimiques spécifiques capables d'atteindre des cibles précises, par exemple des cellules tumorales, ouvre la voie à de nouvelles thérapeutiques. On peut imaginer de nombreuses inventions et applications dans un avenir relativement proche de l'ordre de la dizaine ou de la vingtaine d'années : combinatoire biologique et structures neuronales, réparation de neurones dans le cerveau, implants rétiniens interfacés avec le cerveau, réponses à des problèmes environnementaux tels que dispositifs biologiques de conversion photovoltaïque ou de purification d'eau, etc.

Ces développements aussi bien en recherche fondamentale que technologique ouvrent des perspectives inouïes. Ainsi par exemple l'ordinateur quantique nous laisse entrevoir une puissance de calcul et un temps d'exécution inimaginables jusqu'à présent, et la possibilité de simuler une infinité de processus physiques : il cache peut-être dans ces circuits atomiques le secret de la création de l'ordinateur doté d'intelligence artificielle, avec les problèmes éthiques qui ne manqueraient alors pas d'être soulevés relatifs par exemple à la possibilité de transfert de mémoire ou d'intelligence entre l'homme et la machine, ou entre hommes par l'intermédiaire d'une machine...

On a souvent dit que le XXI^{ème} siècle sera celui de l'information, une information jusqu'à présent de plus en plus sensible au risque de piratage et qui curieusement semble se diriger vers son élimination complète par l'utilisation de la cryptographie quantique.

Demain nos administrateurs réseau et nos équipes de support informatique devront peut-être maîtriser la physique quantique pour dépanner les utilisateurs et bientôt on en apprendra les rudiments au collègue !

Les lois de la mécanique quantique, qui nous paraissent si étranges, nous permettront peut-être demain de résoudre des problèmes que se pose la science aujourd'hui à propos de l'esprit ou de l'univers, car les moyens des ordinateurs quantiques nous permettront d'appréhender des questions complexes, accessibles à aucun ordinateur conventionnel. Un jour peut-être, pourrons-nous répondre à des questions qui sont aujourd'hui du ressort de la philosophie.

Ainsi cette conclusion, par delà les avancées fulgurantes des nanotechnologies et les progrès qu'elles apportent à notre société, ouvre-t-elle la porte aux dangers qu'elles recèlent et aux problèmes éthiques qu'elles peuvent poser, questions qui pourraient à elles seules faire l'objet de conférences et de débats.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- (1) J.P. Nougier, "Les nanotechnologies, le nanomonde", Bulletin de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier 38, 245-266 (2007)
- (2) E. Rosencher ("Le monde quantique au quotidien : l'optoélectronique", 590^{ème} conférence de l'Université de tous les savoirs, 12 Juillet 2005, disponible sur <http://www.canalu.fr>)

- (3) N. Deguffroy, V. Tasco, A.N. Baranov, E. Tournié, B. Satpati, A. Trampert, M. Dunaevskii, A. Titkov, M. Ramonda, "Molecular beam epitaxy of InSb/GaSb quantum dots", *J. Appl. Phys.* **101**(12), 124309 (2007)
- (4) A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, « Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities », dans *Physical Review Letters*, **49**, Iss. 2, pp.91-94 (1982)
- (5) D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, & A. Zeilinger, *Experimental quantum teleportation*, *Nature* **390**, 6660, 575-579 (1997)
- (6) Schmitt-Manderbach, H. Weier, M. Fürst, R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Scheid, J. Perdignes, Z. Sodnik, C. Kurtsiefer, J.G. Rarity, A. Zeilinger, H. Weinfurter, "Experimental Demonstration of Free-Space Decoy-State Quantum Distribution over 144 km", *Pys. Rev. Lett.* **98**, 10504 (2007).
- (7) Rapport AFRL-PR-ED-TR-2003-0034, *Teleportation Physics Study*, Eric W. Davis, août 2004. Accessible en ligne à l'adresse <http://www.fas.org/sgp/eprint/teleport.pdf>, voir aussi l'article sur Wikipedia (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Téléportation>).
- (8) J.P. Nozieres, "La spintronique", http://www.spintec.fr/IMG/pdf/Spintronique_Encycl_Universa.pdf