

Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen  
Faculté SNV & STU  
Département de biologie  
Master Biochimie Appliquée  
2022-2023

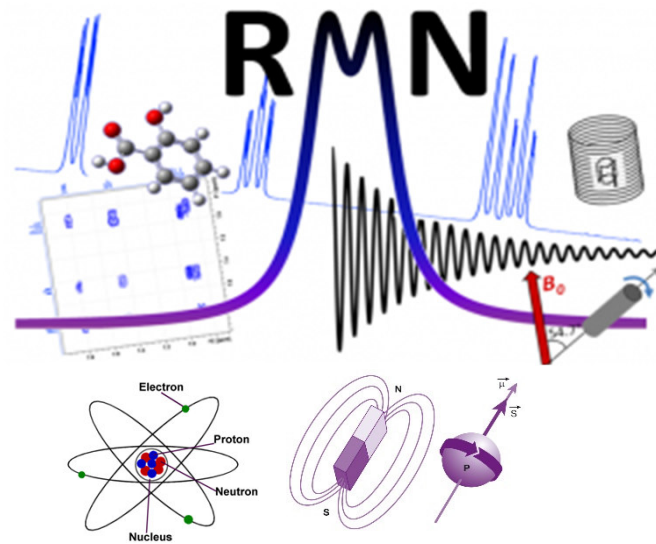
## **Master 1 Biochimie Appliquée**

### **Semestre 2: Unité Méthodologie**

### **Méthodes d'identification et d'analyse structurale**

**Cours: Dr. Benariba N.**

# Chapitre 5: La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

La RMN représente un outil puissant, non destructif, principalement utilisé dans la détermination structurale d'un produit purifié, ou des mélanges de produits à l'état solide ou liquide. La RMN des liquides est un outil de base pour l'étude des petites molécules organiques en solution, substances naturelles ou synthétiques, et l'étude des macromolécules solubles (protéines, acides nucléiques, polysaccharides, polymères synthétiques).

La spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN) est une technique analytique extrêmement puissante qui a été développée par les physiciens en 1938. Les premières mesures du magnétisme nucléaire ont été réalisées en 1946. A partir des années 70, le phénomène RMN est exploité en chimie organique, chimie inorganique, science des matériaux, puis en biochimie.

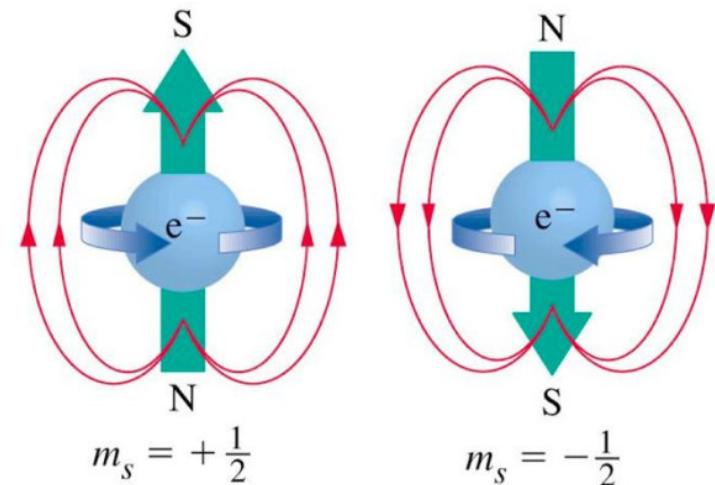
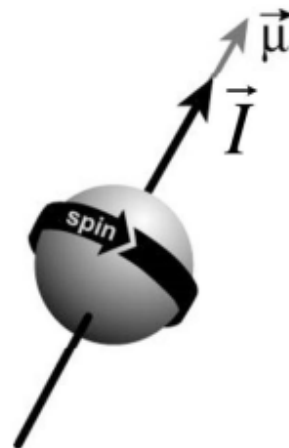
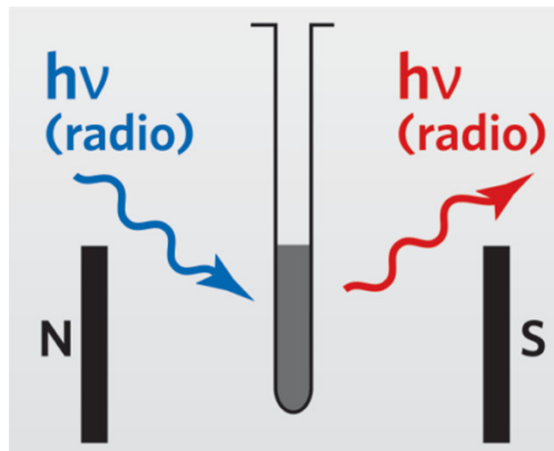
C'est à partir des années 80 que les biologistes vont s'intéresser à cette technique analytique qui offre de large possibilité d'investigation des molécules de la matière vivante, il y aura la spectroscopie par RMN, puis l'imagerie par RMN (IRM).

## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

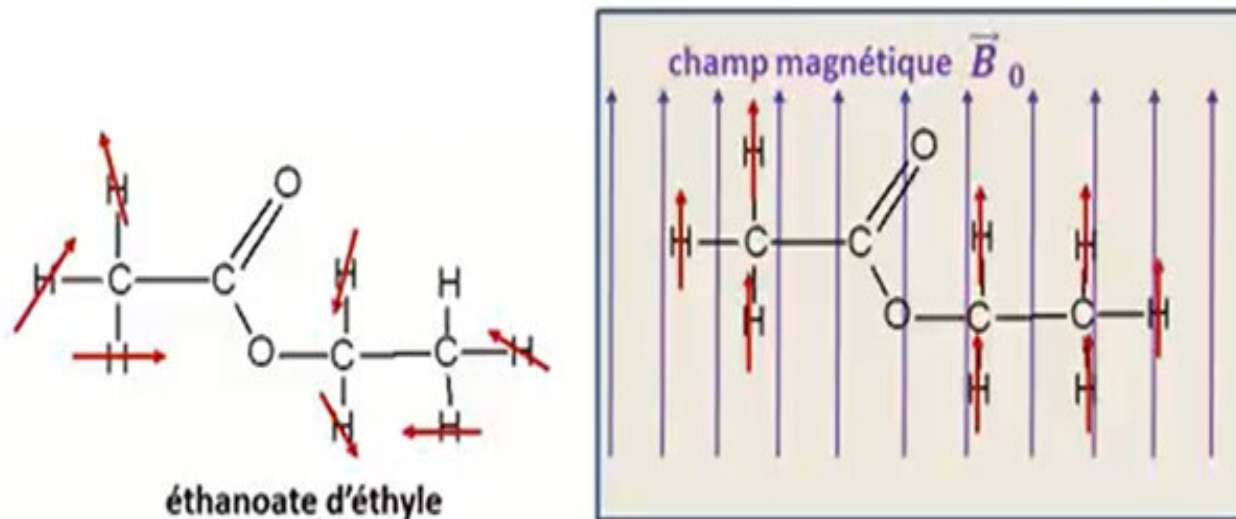
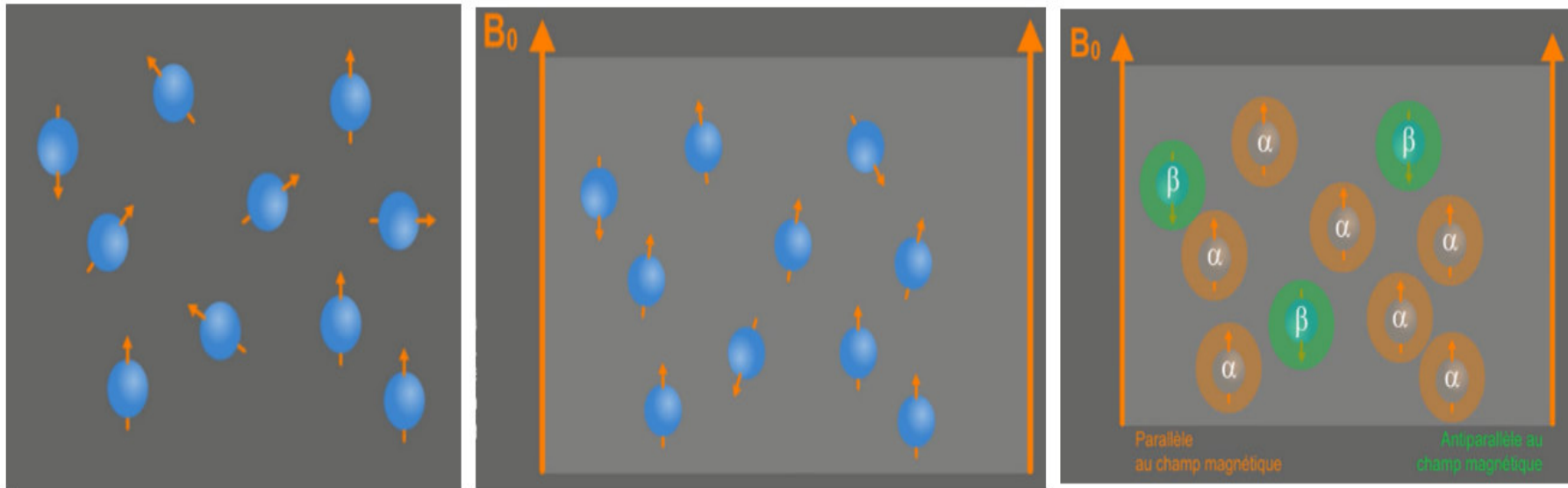
### 4-4 Principe général de la RMN

Le principe de la RMN repose sur l'utilisation d'un champ magnétique  $\mathbf{B}_0$  pour orienter les spins nucléaires des atomes. L'excitation de ces atomes par une onde radio à la fréquence de résonance fait basculer les spins. Après excitation, les spins reviennent à leur état initial ; c'est l'état de relaxation. L'énergie libérée lors de la relaxation génère un petit courant détecté par un détecteur c'est le signal RMN, puis le traitement du signal par ordinateur permet l'obtention d'un spectre RMN. Le champ magnétique  $B_0$  imposé doit être intense, il est environ 400 000 fois le champ magnétique terrestre.

- la résonance est une excitation des atomes (placés dans un champ magnétique) par les ondes radio, et qui est traduite par le passage d'un état de spin nucléaire à un autre.



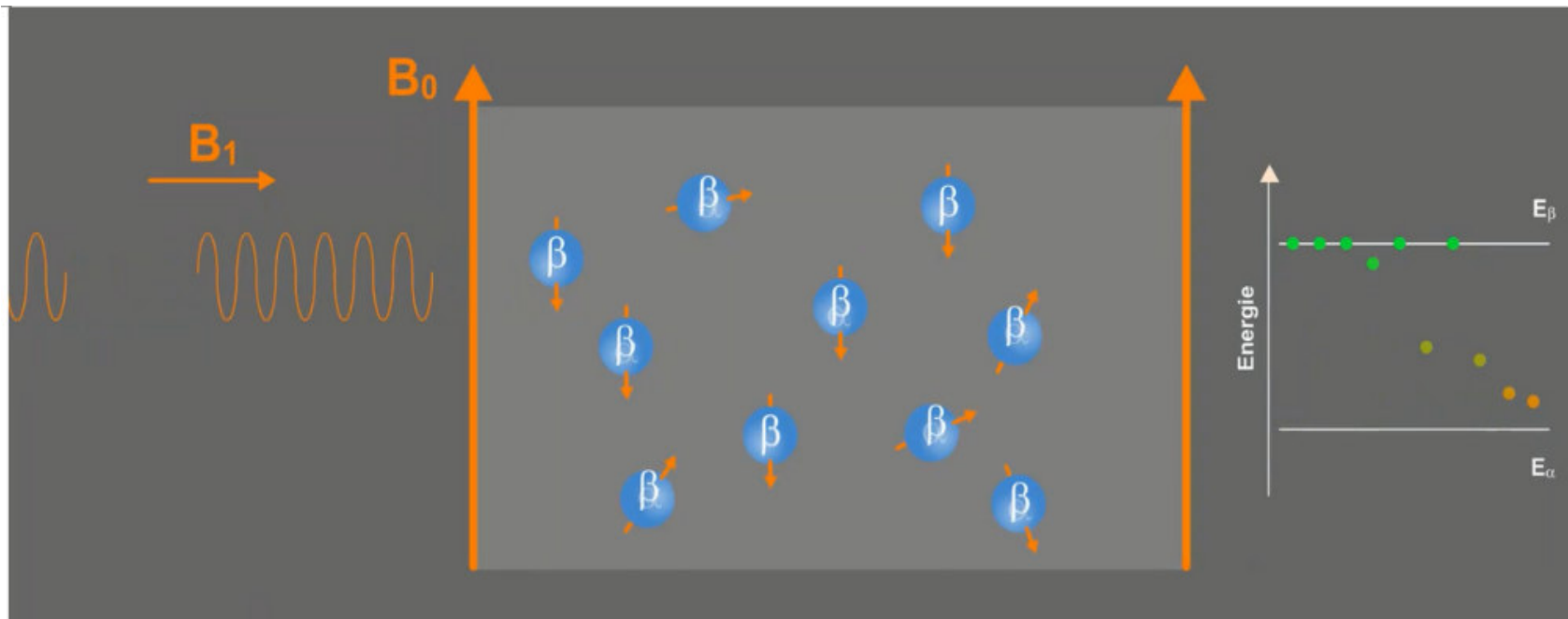
## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)



**Figure:** Orientation des moments magnétiques du spin nucléaire, aléatoire en absence et en présence du champ magnétique  $B_0$

## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

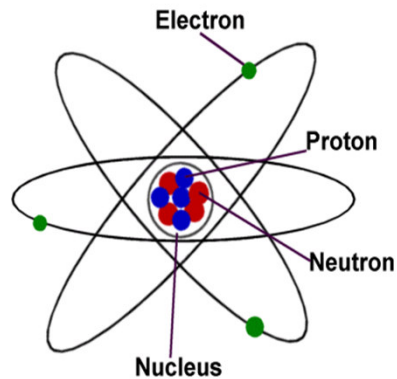
L'application d'un champ magnétique  $B_1$  perpendiculairement à  $B_0$ , souvent appelé le champ radiofréquence, permet une transition du niveau  $\alpha$  vers  $\beta$ . La transition du niveau bas au niveau haut peut avoir lieu par absorption d'une radiofréquence. Lorsque la transition a lieu, on dit qu'il y a résonance du noyau d'où on parle de la résonance magnétique nucléaire RMN. Après excitation, le champ  $B_1$  cesse, l'aimantation qui a été basculée dans le plan transversal va évoluer pour revenir à son état d'équilibre, parallèle à  $B_0$ . C'est le phénomène de relaxation.



**Figure :** Transition de spin (Résonance magnétique nucléaire)

## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

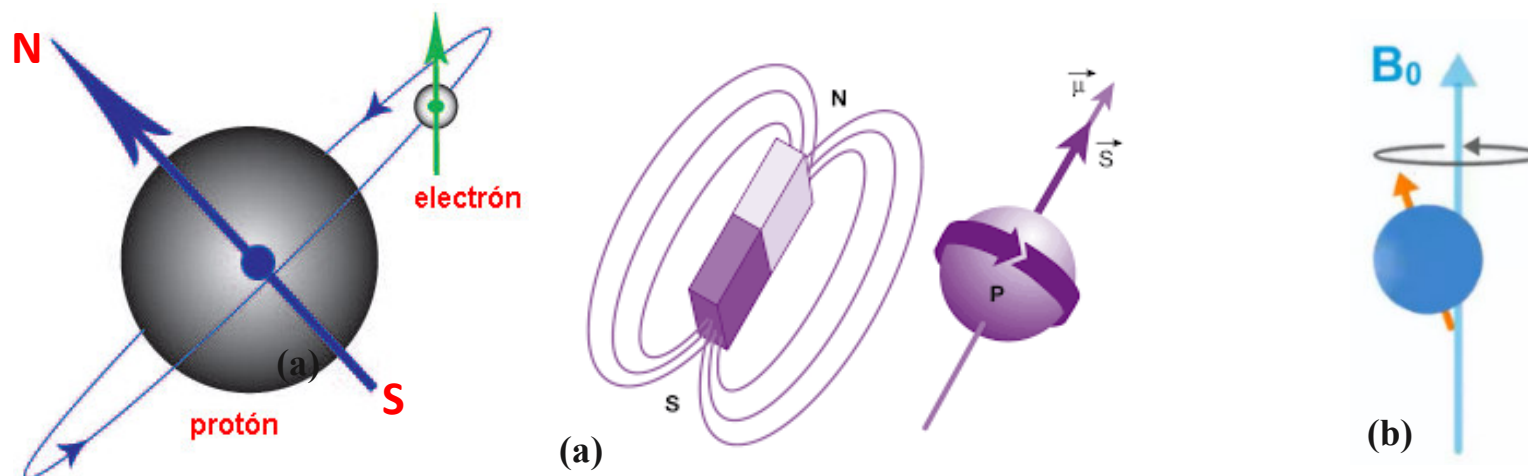
**Noyau atomique** est un ensemble de nucléons (neutrons + protons)



$A$   
 $Z$   $\times$

**X**: noyau atomique;  
**A**: nombre de masse;  
**Z**: nombre de charge

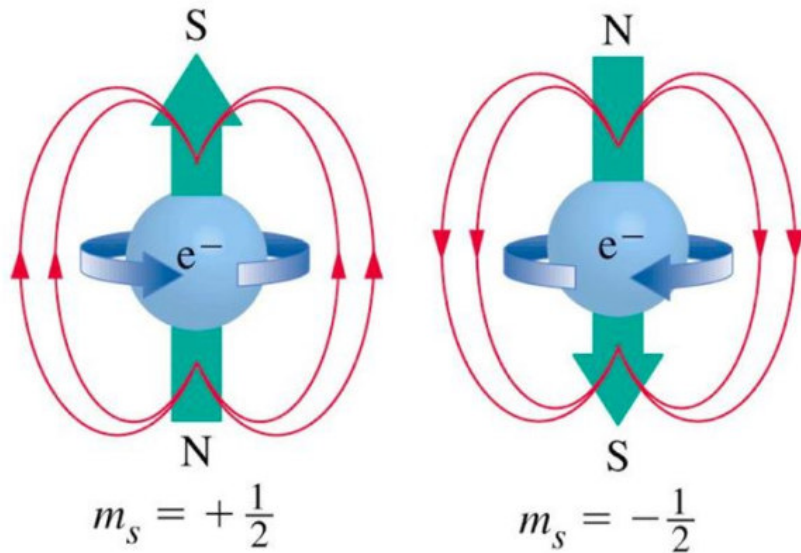
Le **spin nucléaire** se définit comme la résultante des moments cinétiques (= rotation sur eux-mêmes) des protons + neutrons (= nucléons) d'un atome. Le proton se comporte comme un aimant (micro-aimant) tournant autour d'un axe. A ce spin nucléaire est associé un nombre quantique **I** et un **moment magnétique**  $\vec{\mu}$ .



**Figure** : Représentation schématique d'un spin nucléaire ; **(a)** le magnétisme nucléaire, **(b)** précession de Larmor. <sup>7</sup>

## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

Le nombre quantique **I** peut prendre plusieurs valeurs **0; 1; 1/2 ou 3/2** et ce; selon **A** et **Z** de l'atome concerné. La RMN concerne essentiellement les noyaux avec un nombre de spin = 1/2 ( $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{19}\text{F}$  et  $^{31}\text{P}$ ).



A et Z	Atome	Spin nucléaire «I»
A: impaire ↓ I : demi-entier	$^1\text{H}; ^{19}\text{F}; ^{13}\text{C}; ^{31}\text{P}$	$\frac{1}{2}$
	$^{11}\text{B}; ^{23}\text{Na}$	$\frac{3}{2}$
	$^{17}\text{O}; ^{27}\text{Al}$	$\frac{5}{2}$
A: paire Z:impaire ↓ I : entier	$^2\text{H}; ^{14}\text{N}$	1
	$^{10}\text{B}$	3
A et Z paires ↓ I: nul	$^{12}\text{C}; ^{16}\text{O}$	0



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

Les principaux noyaux d'intérêt biologique possédant des propriétés magnétiques sont les noyaux d'hydrogène ( $^1\text{H}$ ), de l'isotope du carbone ( $^{13}\text{C}$ ), du fluor ( $^{19}\text{F}$ ), du phosphore ( $^{31}\text{P}$ ) (spin  $1/2$ ). Seul le noyau d'*hydrogène*, formé d'*un seul proton*, joue un rôle important en imagerie aujourd'hui (on parle d'IRM « protonique »). Cela est lié au fait que *l'hydrogène, qui représente 2/3 des atomes de l'organisme*, possède un moment magnétique intrinsèque (protonique) élevé et donne lieu à un phénomène de résonance très net.

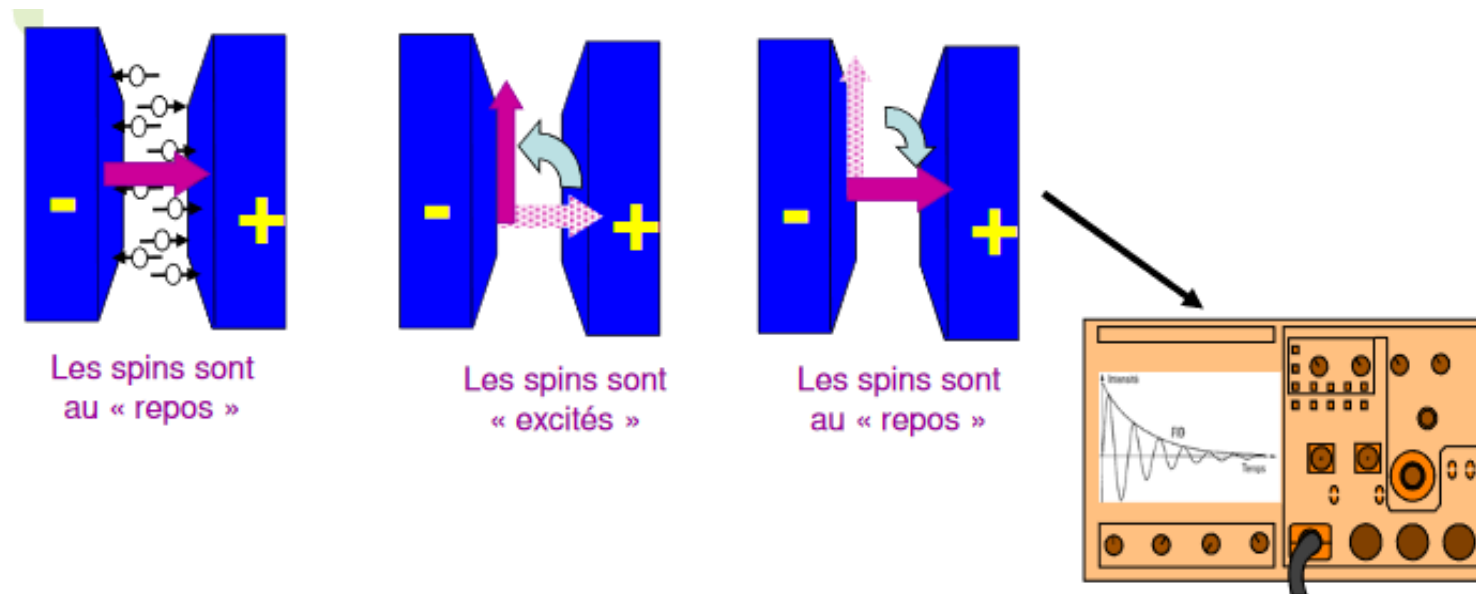
**Tableau :** Propriétés nucléaires des noyaux les plus étudiés en RMN

Noyau	$^1\text{H}$	$^{13}\text{C}$	$^{15}\text{N}$	$^{19}\text{F}$	$^{29}\text{Si}$	$^{31}\text{P}$	$^{57}\text{Fe}$	$^{109}\text{Ag}$	$^{113}\text{Cd}$	$^{119}\text{Sn}$
I	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$
Abondance naturelle (%)	99,98	1,11	0,37	100	4,7	100	2,19	48,18	12,26	8,58

## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Résumé du principe général de la RMN

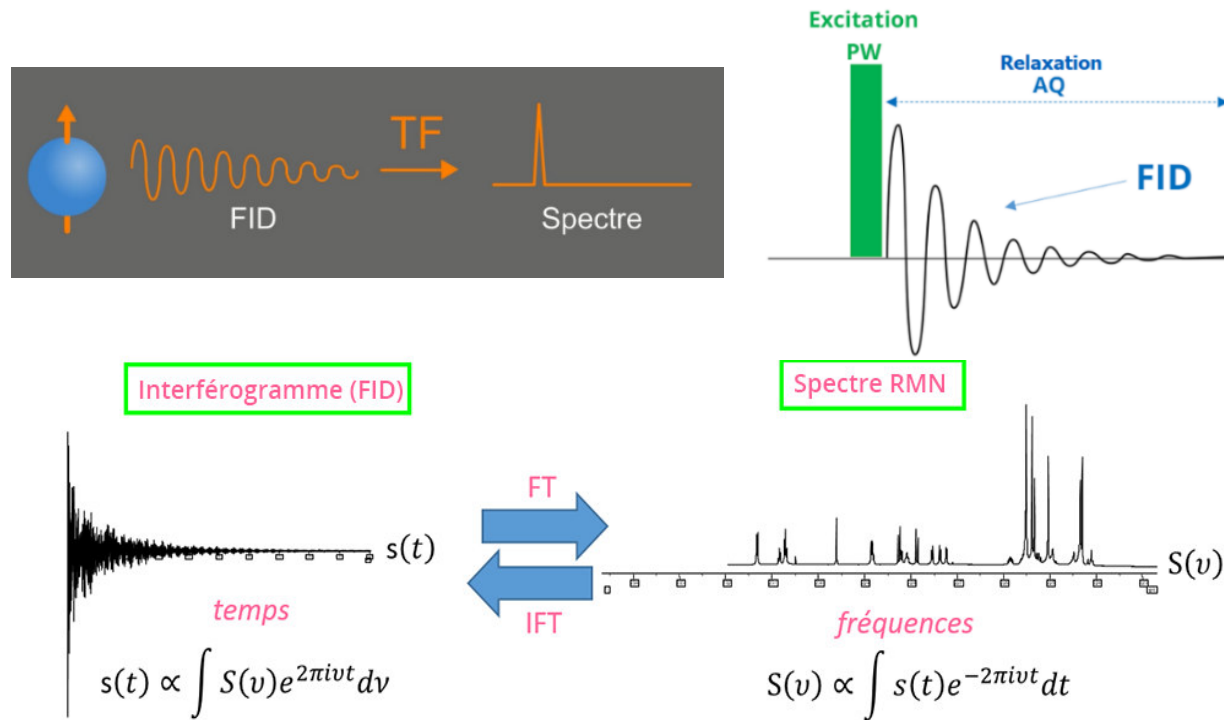
- 1) Utiliser un champ magnétique  $B_0$  pour orienter les spins nucléaires des atomes.
- 2) Exciter ces spins par une onde radio à la fréquence de résonance qui fait basculer certains spins.
- 3) Après excitation, les spins reviennent à leur état initial; c'est l'état de relaxation
- 4) L'énergie libérée lors de la relaxation génère un petit courant détecté par un détecteur c'est le signal RMN, puis le traitement du signal par ordinateur permet l'obtention d'un spectre RMN. Le signal détecté est appelé le **FID** (Free Induction Decay). Il représente une opération mathématique qui permet de transformer un signal, qui évolue en fonction du temps (FID) en signal dépendant de la fréquence, ce qui permet ensuite d'obtenir le spectre de RMN.



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Résumé du principe général de la RMN

- 1) L'énergie libérée lors de la relaxation génère un petit courant détecté par un détecteur c'est le signal RMN, puis le traitement du signal par ordinateur permet l'obtention d'un spectre RMN. Le signal détecté est appelé le **FID** (Free Induction Decay). Il représente une opération mathématique qui permet de transformer un signal, qui évolue en fonction du temps (FID) en signal dépendant de la fréquence, ce qui permet ensuite d'obtenir le spectre de RMN.

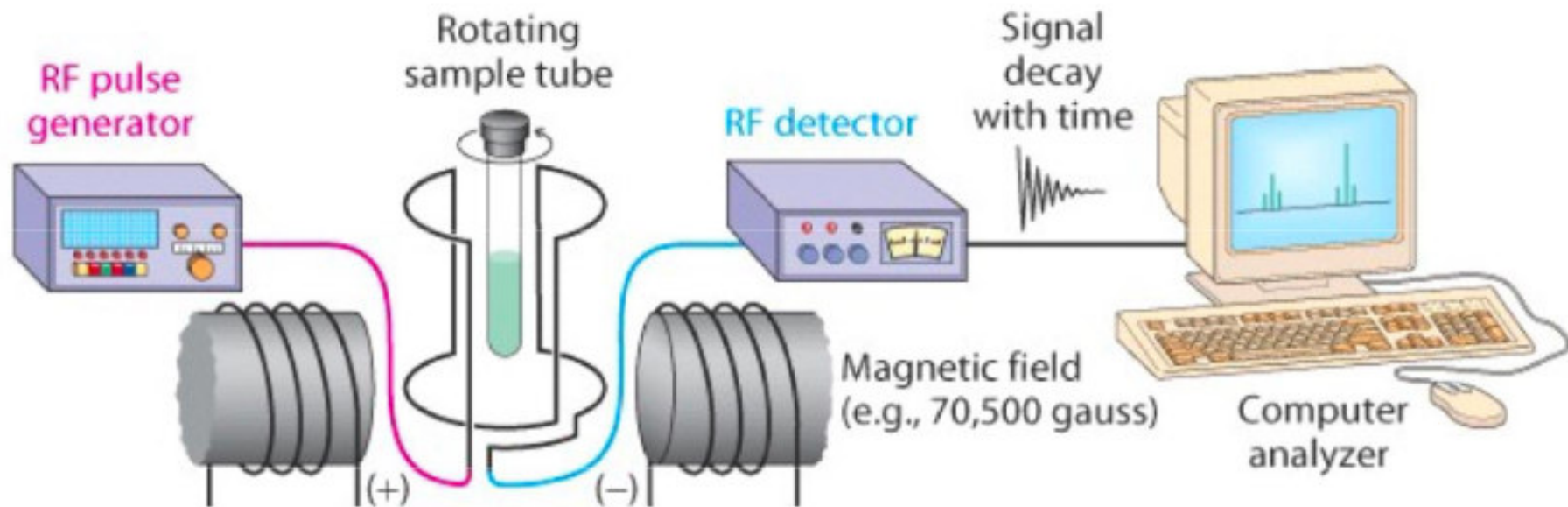


**Figure :** Transformé de fourrier et spectre RMN

## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Appareillage de la RMN

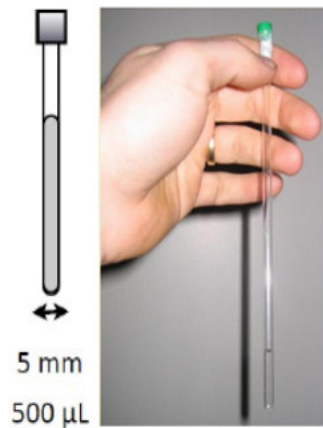
- L'excitation des protons nécessite un champ magnétique intense. Les spectromètres RMN peuvent atteindre une intensité de 23,5 Tesla. Ce champ magnétique est créé par une bobine supraconductrice parcourue par un champ électrique. L'échantillon est placé au centre de la bobine.



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Appareillage de la RMN

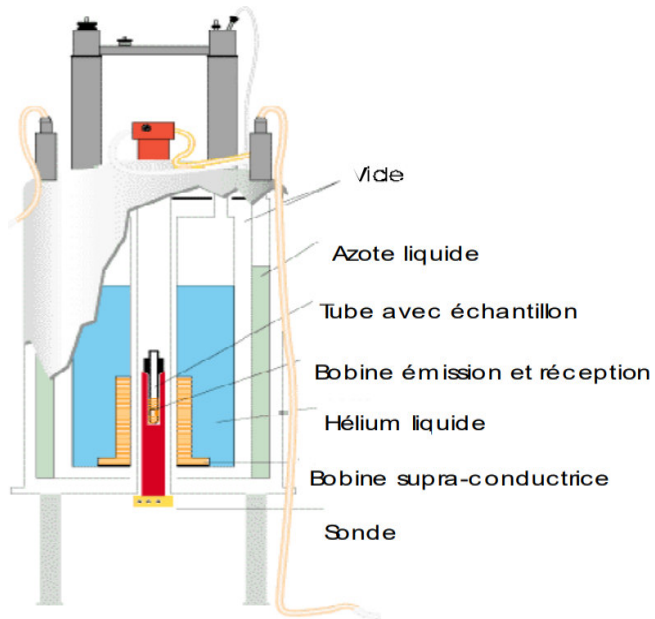
- L'espèce chimique étudiée est introduite dans un tube de 18 cm de long et 5mm de diamètre contenant un solvant deutéré (hydrogènes remplacés par son isotope le deutérium), car le deutérium n'est pas excité par le champ magnétique ; par exemple, le solvant de choix pour l'étude des spectres protons est le chloroforme deutérie  $\text{CDCl}_3$ , ou le  $\text{CCL}_4$ . Le tube est introduit au sein de l'appareil et l'analyse est lancée via l'ordinateur. 5 min plus tard le spectre apparaît à l'écran. L'analyse RMN se déroule en phase liquide. Cependant, elle est également possible en phase solide avec une adaptation de l'appareillage.





# 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

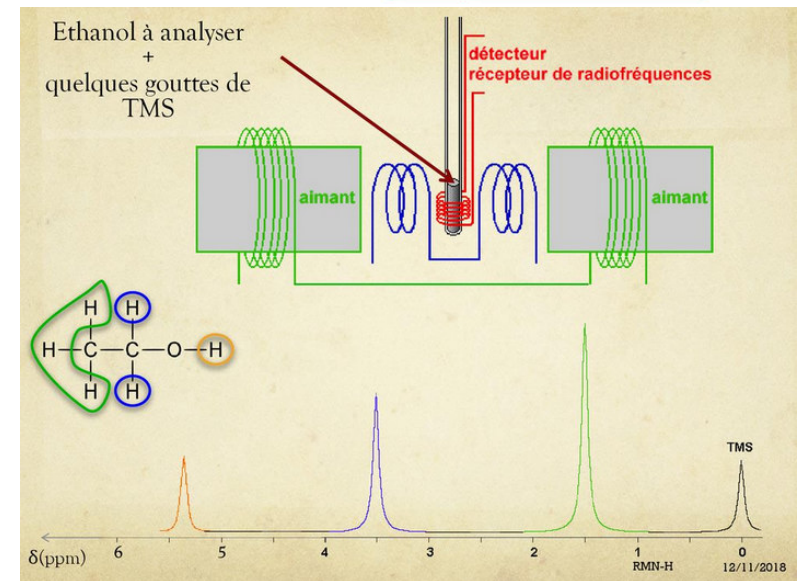
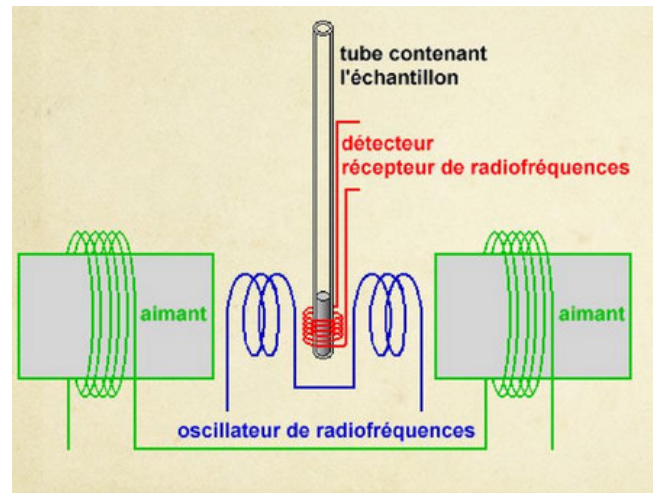
## Appareillage de la RMN



Poste de pilotage

Console

Aimant Supraconducteur

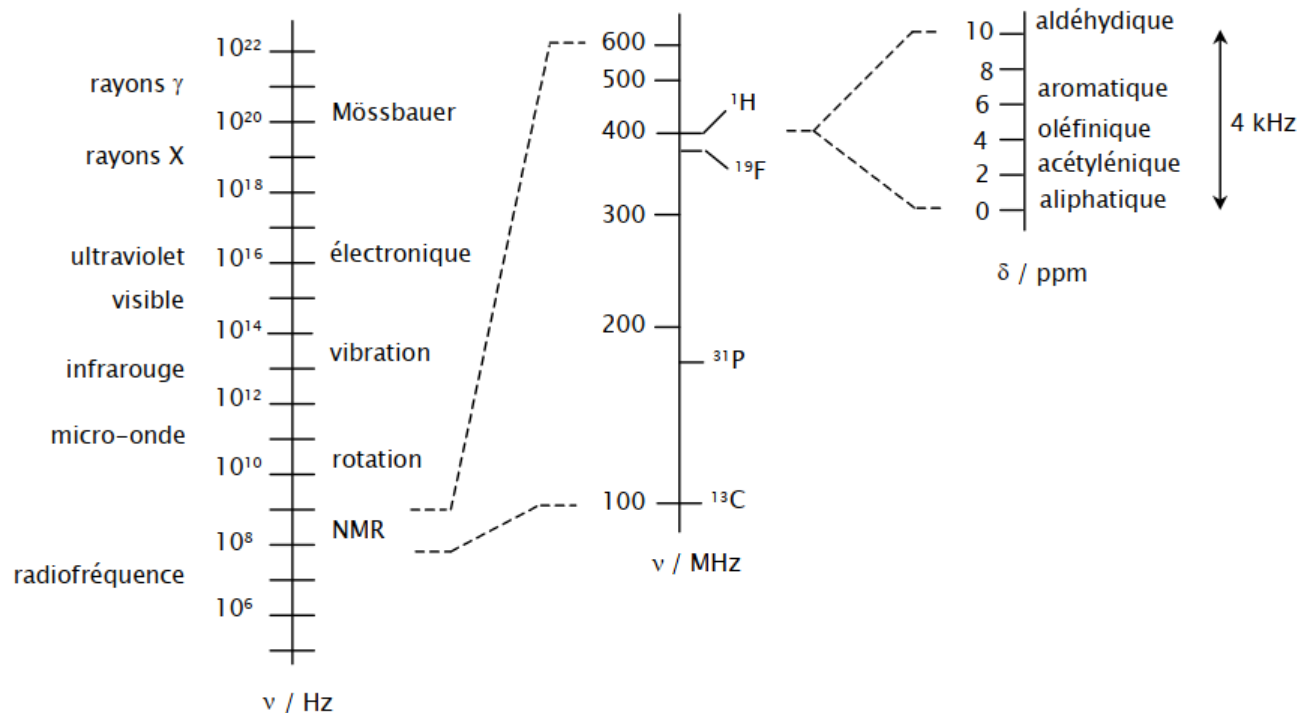


## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Appareillage de la RMN

**Tableau :** Fréquences des spectromètres RMN couramment utilisée en analyse

$B_0$ / tesla	Fréquence $\nu$ / $10^6$ Hz = MHz	Energie / J.mol <sup>-1</sup>
1,4092	60	0,024
2,1138	90	0,036
7,0460	300	0,120
9,3960	400	0,159
23,49	1000	0,398



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Appareillage de la RMN

Le spectromètre RMN dispose :

- 1) **d'un aimant à l'origine du champ  $B_0$** . Il s'agit d'un électro-aimant constitué d'un solénoïde alimenté par un courant continu c-c stabilisé. Lors du passage du courant, l'élévation de température (par effet Joule) de l'aimant nécessite également la mise en place d'un circuit de refroidissement de l'aimant. Ce circuit de refroidissement n'est pas mentionné sur ce schéma. Pour des champs importants (à partir de 2 Tesla), on a recours à des cryoaimants utilisant des bobines supraconductrices refroidies à l'hélium liquide. On ne voit plus alors la bobine qui est insérée dans un énorme vase de Dewar, pour ces matériels  $B_0$  est vertical.
- 2) **d'un émetteur-récepteur de radiofréquences RF**. Cet émetteur est constitué d'une bobine alimentée par un courant alternatif (de fréquence égale à la fréquence de Larmor). Après l'impulsion, cette bobine est utilisée en récepteur pour capter le F.I.D.
- 3) **d'une bobine de découplage**. Cette bobine, analogue à celle constituant l'émetteur-récepteur RF permet de réaliser des expériences de double irradiation, servant entre autres à supprimer des couplages spin-spin (expérience de découplage). Nous verrons ce type d'expérience en spectroscopie de RMN du  $^{13}\text{C}$ .
- 4) **d'un ordinateur**. Cet ordinateur est couplé à l'émetteur-récepteur et aux différents éléments constitutifs de l'appareillage RMN. Il est à la fois chargé de piloter le spectromètre, de stocker les F.I.D., d'assurer les transformations de Fourier et de gérer la table traçante.
- 5) **d'une table traçante**. Ce dernier élément permet l'obtention du spectre sur support papier.

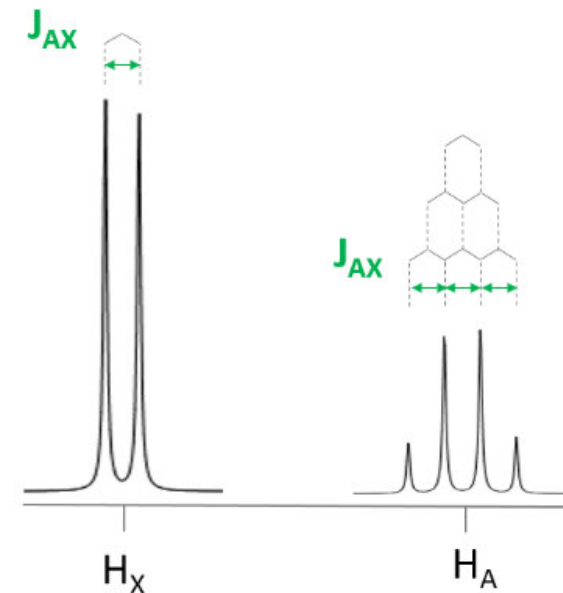
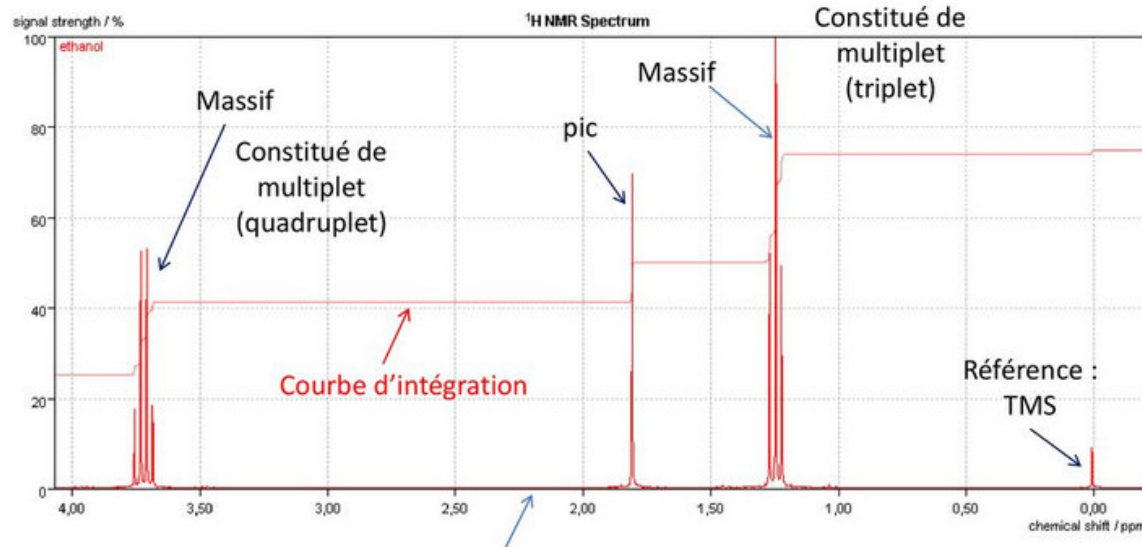


## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Spectre RMN : cas du $^1\text{H}$

Un spectre RMN du proton représente les pics de résonance des protons en fonction du déplacement chimique  $\delta$ , l'origine (Référence) étant à droite du graphe et les valeurs croissantes sont orientées vers la gauche (**Figure**). Un pic est désigné sous le terme de signal en RMN. Chaque signal correspond à un atome ou un groupe d'atomes d'hydrogène, il est caractérisé par sa position, c'est-à-dire son déplacement chimique  $\delta$  (ppm), sa forme (le nombre de pics), son intensité relative, et la distance entre les raies (couplage scalaire  $J$ ). L'environnement de l'atome ou du groupe d'atomes d'hydrogène influence sur le déplacement chimique du signal et sur sa multiplicité (nombre de pics composant le signal).

### Spectre RMN de l'éthanol

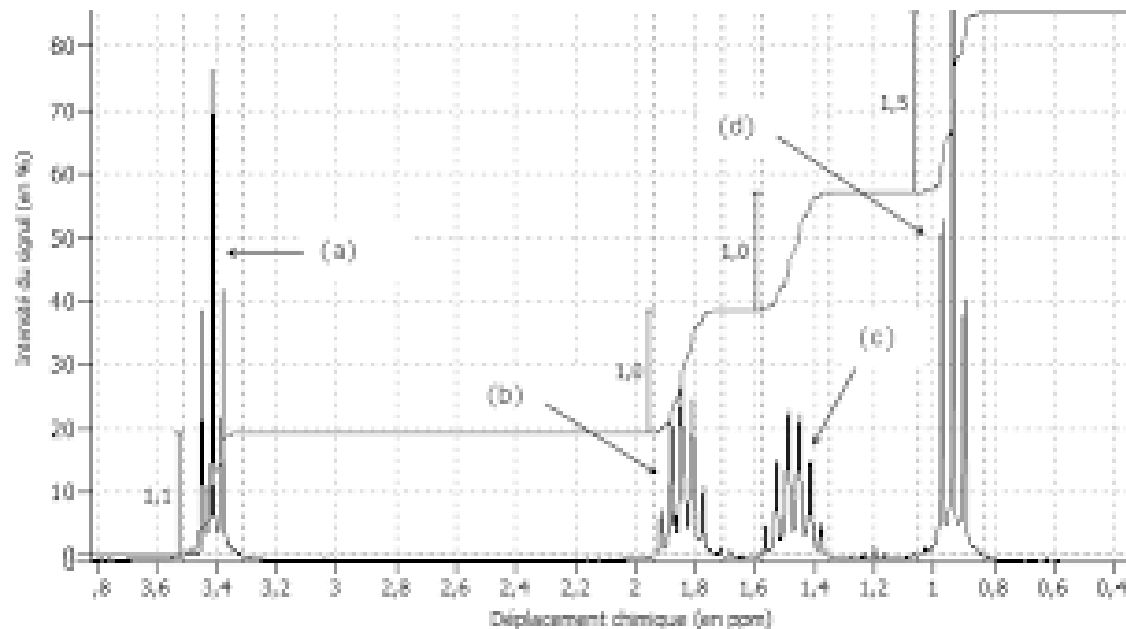


## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Analyse du spectre RMN $^1\text{H}$

En connaissant la formule brute de la molécule, la RMN permet de déterminer sa structure à partir des éléments suivants :

- **La valeur des déplacements chimiques** des différents signaux permet d'identifier certaines liaisons et groupements chimiques : des fourchettes de déplacements chimiques sont connues suivant le type de groupement ou liaison (en utilisant une table de données)
- **La courbe d'intégration** permet de déterminer le nombre de protons équivalents entre eux et les proportions entre les différents types de protons.
- **La multiplicité des pics** permet de connaître le nombre de protons portés par les carbones voisins.



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Analyse du spectre RMN $^1\text{H}$

#### Déplacement chimique

le déplacement chimique  $\delta$ , définie par la formule suivante.

$$\delta = \frac{(\text{fréquence de résonance de l'atome} - \text{fréquence de résonance du TMS}) \times 10^6}{\text{fréquence du spectromètre}}$$

Exemple : le déplacement chimique de l'eau à 500 MHz:

$$\delta = \frac{((500.00212\text{MHz} - 500.00000\text{MHz})) \times 10^6}{500\text{MHz}} = 4,24 \text{ ppm}$$

Le rapport  $(\nu_i - \nu_{\text{réf}}) / \nu_0$  est sans dimension et très faible. C'est pourquoi on multiplie le rapport par  $10^6$  et ainsi  $\delta$  s'exprime en **ppm** (partie par million).

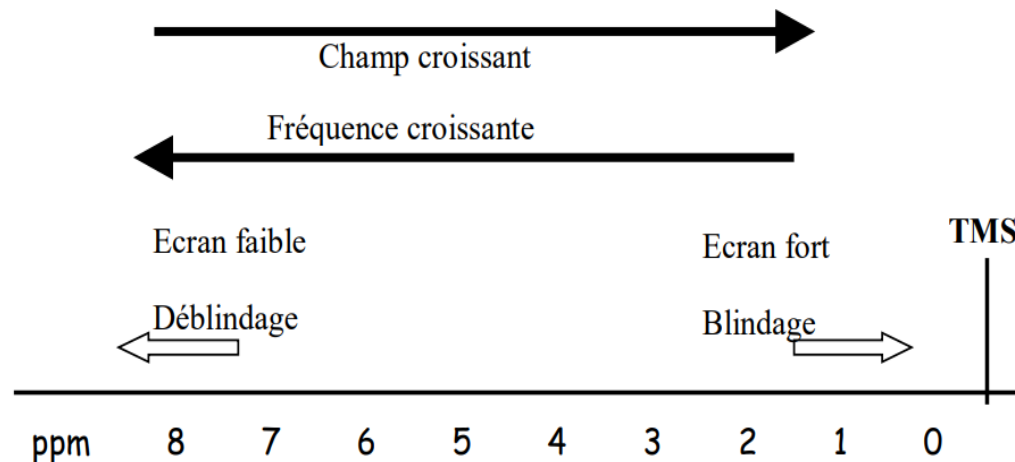
Sur le spectre RMN, le déplacement chimique est orienté de droite à gauche, sa valeur varie **entre 0 et 15 ppm**. Lorsqu'un proton est proche d'un atome très électronégatif, les électrons environnants sont plus proches de cet atome que de l'hydrogène : l'effet d'écran est amoindri.

## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Interaction du spin nucléaire $I$ avec un champ magnétique statique $B_0$

#### Blindage des noyau:

Lorsqu'on soumet une molécule à un champ magnétique externe, ce champ agit non seulement sur les spins nucléaires, mais en même temps il induit ; dans un plan perpendiculaire à sa direction, une circulation des électrons autour du proton. D'où l'existence d'un champ magnétique interne. Ce champ peut s'ajouter au champ extérieur: **c'est le phénomène de déblindage**. Ce champ peut s'opposer au champ extérieur: **c'est le phénomène de blindage**. Plus le blindage est intense, plus le proton doit être soumis à un champ extérieur fort pour que se produise la résonance. Ceci se traduit par un déplacement des pics d'absorption vers la droite du spectre. L'inverse dans le cas du déblindage.

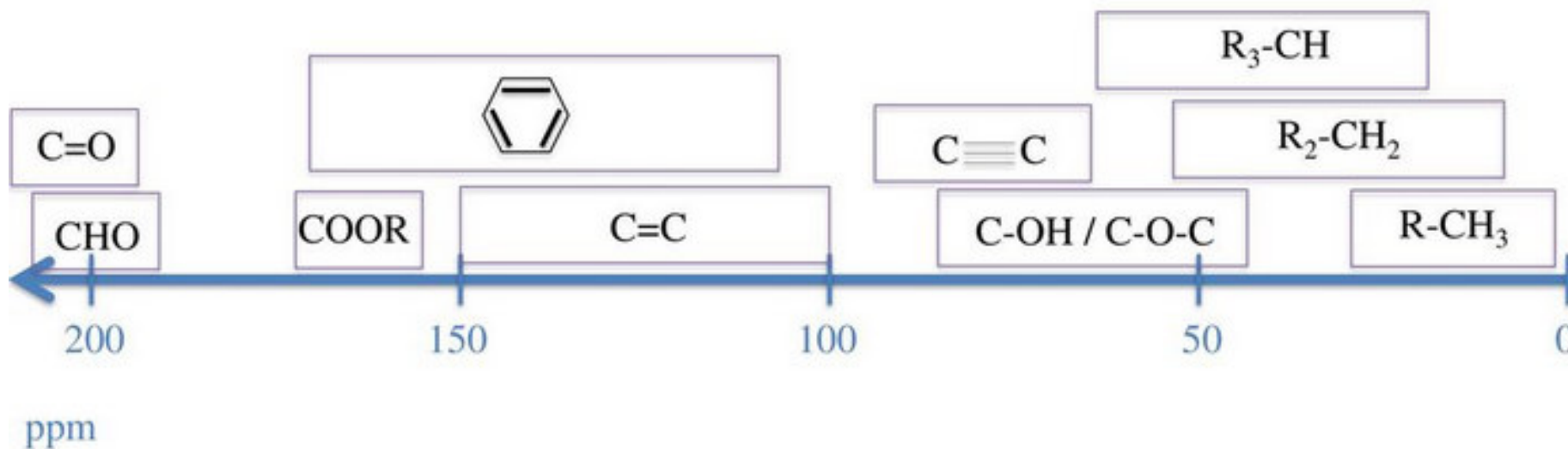


## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Analyse du spectre RMN $^1\text{H}$

**Tableau :** Quelques exemples de déplacements chimiques selon l'environnement proche du proton  $^1\text{H}$  et du  $^{13}\text{C}$

Environnement proche du proton	$\begin{array}{c}   &   \\ \text{---C} & \text{---C---} \\   &   \\ \text{H} & \text{H}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c}   \\ \text{---C---O---} \\   \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c}   \\ \text{---C---X} \\   \\ \text{H} \end{array}$ dérivé halogéné	R-OH alcool	R-CHO aldéhyde	$\begin{array}{c}   &   \\ \text{---C} & \text{---C---} \\   &    \\ \text{H} & \text{O} \end{array}$	H-COO-R ester	R-COOH acide carboxylique
Déplacement chimique	0,8 à 2	3 à 4,1	2,5 à 4	1 à 6	9,5 à 9,9	2 à 2,7	8 à 8,5	10 à 13

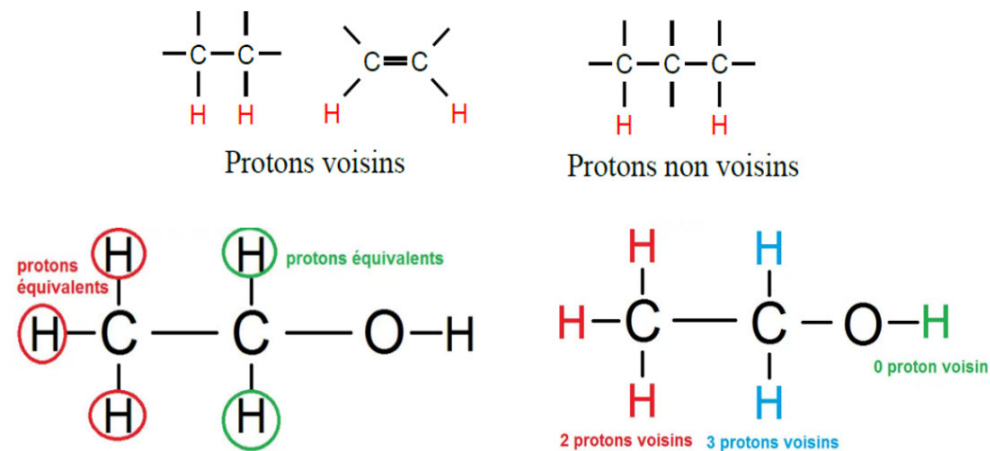


## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Analyse du spectre RMN $^1\text{H}$

#### Multiplicité du signal

Le signal correspond à un proton (ou groupe de protons) équivalent(s), il peut être multiple avec plusieurs pics, cette démultiplication des signaux est due aux interactions entre des protons voisins non équivalents. Deux protons sont dits voisins s'ils sont séparés par trois liaisons simples ou multiples, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas reliés au même atome de carbone mais à des atomes de carbone reliés entre eux. Les protons équivalents sont des protons ayant le même environnement chimique, ils ont le même déplacement chimique et apparaissent sous le même pic, c'est-à-dire une molécule contient des protons identiques qui seront représentés par un seul pic, dont l'aire est proportionnel au nombre de protons présents.

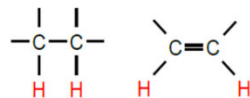


## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

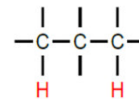
### Analyse du spectre RMN $^1\text{H}$

#### Multiplicité du signal

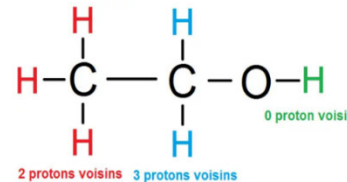
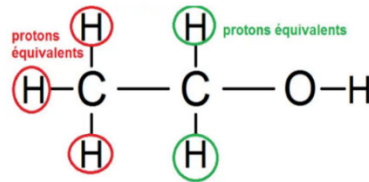
Un proton ou un groupe de protons équivalents ayant  $n$  protons voisins donnera un signal constitué de  $(n+1)$  pics, appelé **multiplet (Figure n°33)**. On parle de singulet (1 pic) ; doublet (2 pics); triplet (3 pics) ; quadruplet (4 pics) ; quintuplet (5 pics)... La multiplicité des pics ne dépend pas du nombre de protons qui résonnent, mais de ceux de leurs voisins



Protons voisins



Protons non voisins



$n = 0$

Singulet



$n = 1$

Doublet



$n = 2$

Triplet



$n = 3$

Quatruplet



$n = 4$

Quintuplet

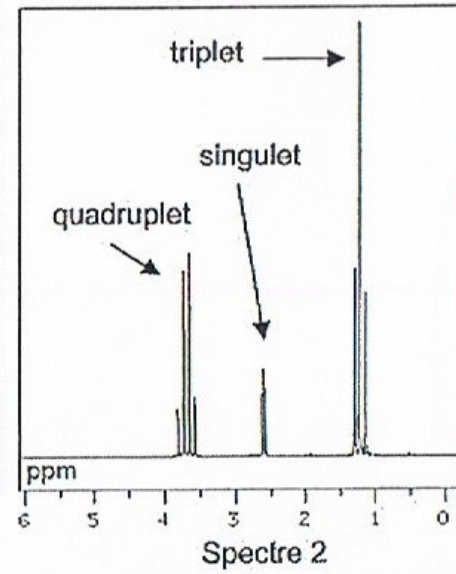
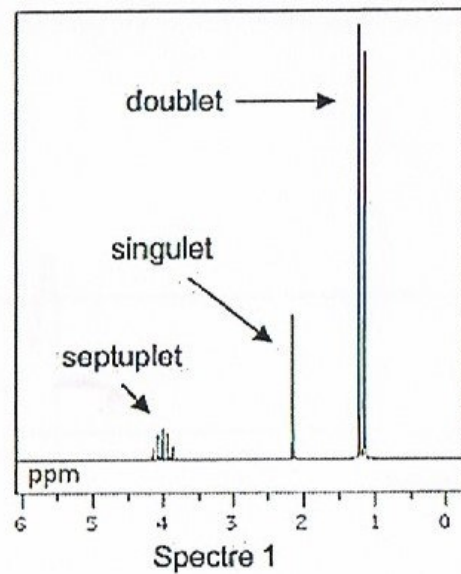
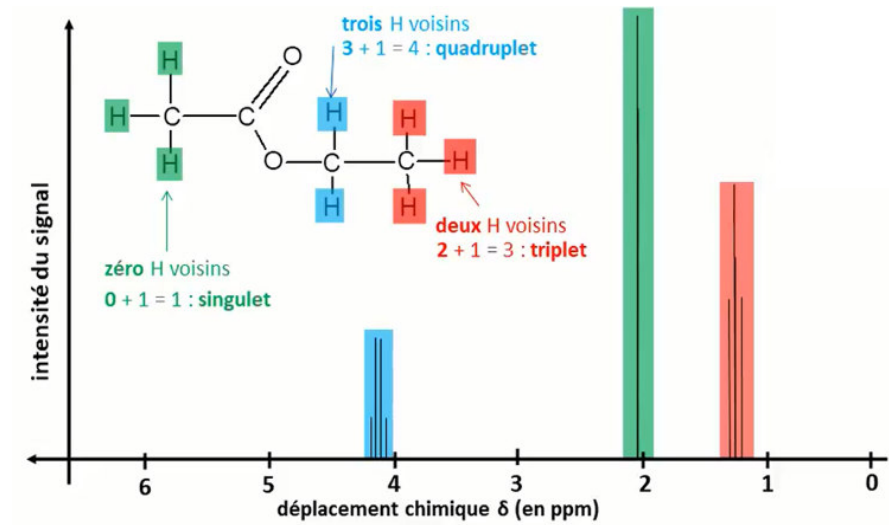
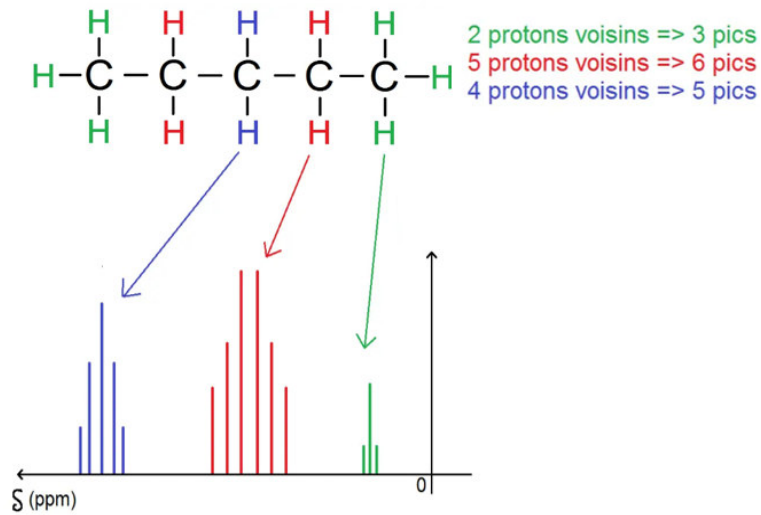


Multiplet

# 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

## Analyse du spectre RMN $^1\text{H}$

### Multiplicité du signal

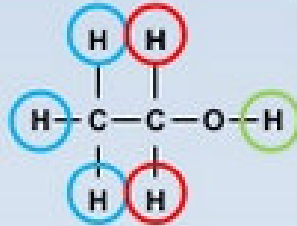




## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

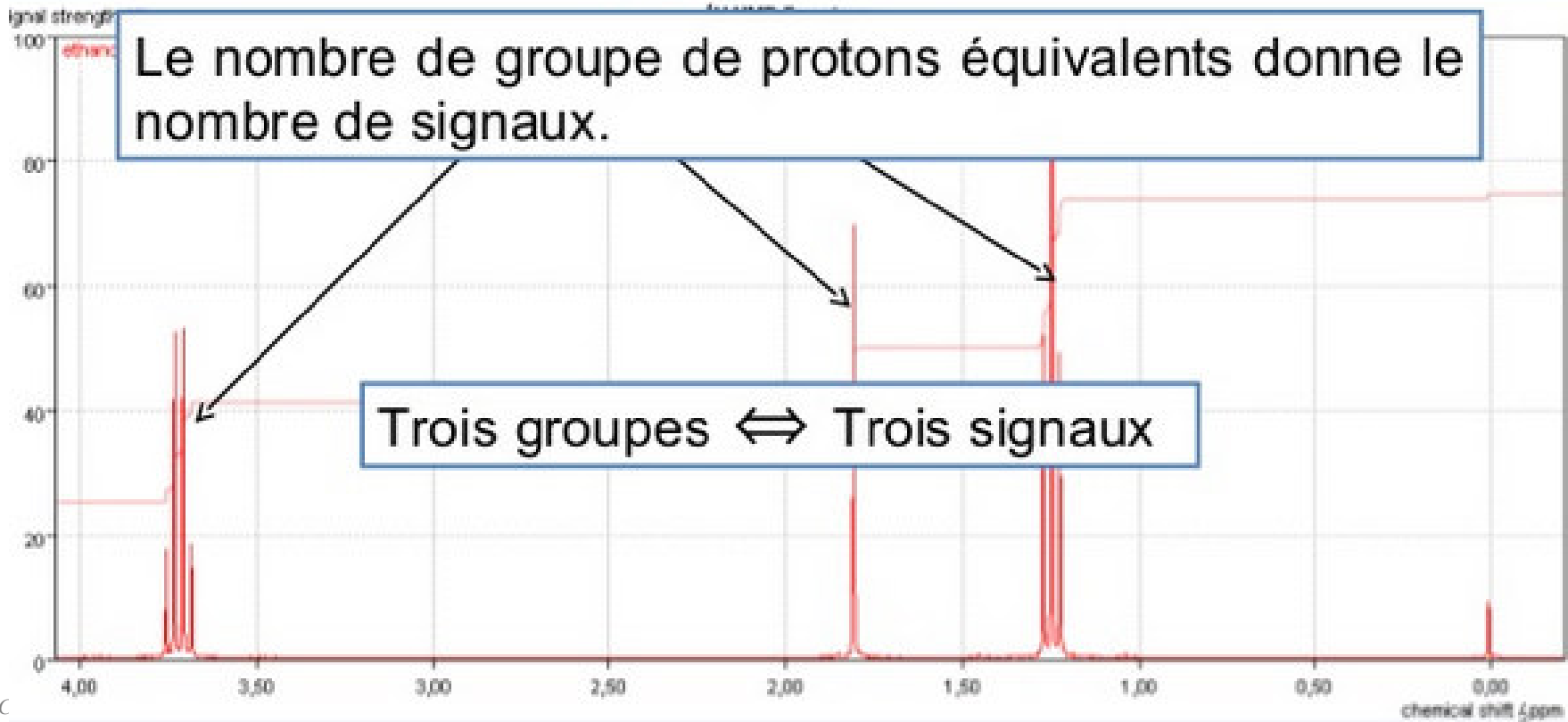
### • Prévision du nombre de signaux (protons équivalents) :

Trois protons équivalents



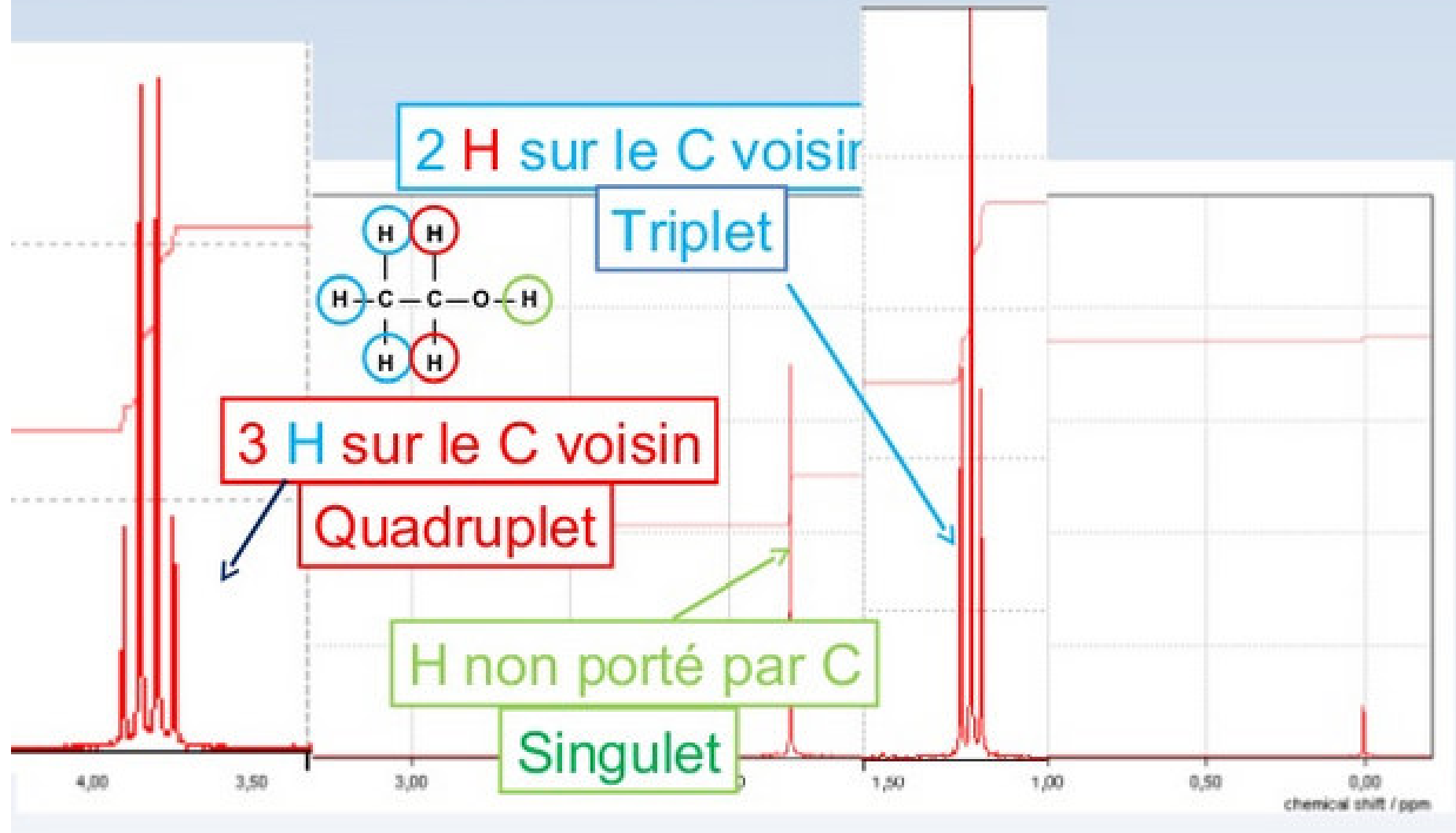
Deux protons équivalents

Un proton seul



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

• Comment utiliser la multiplicité d'un signal ? Règle des (n+1)uplets

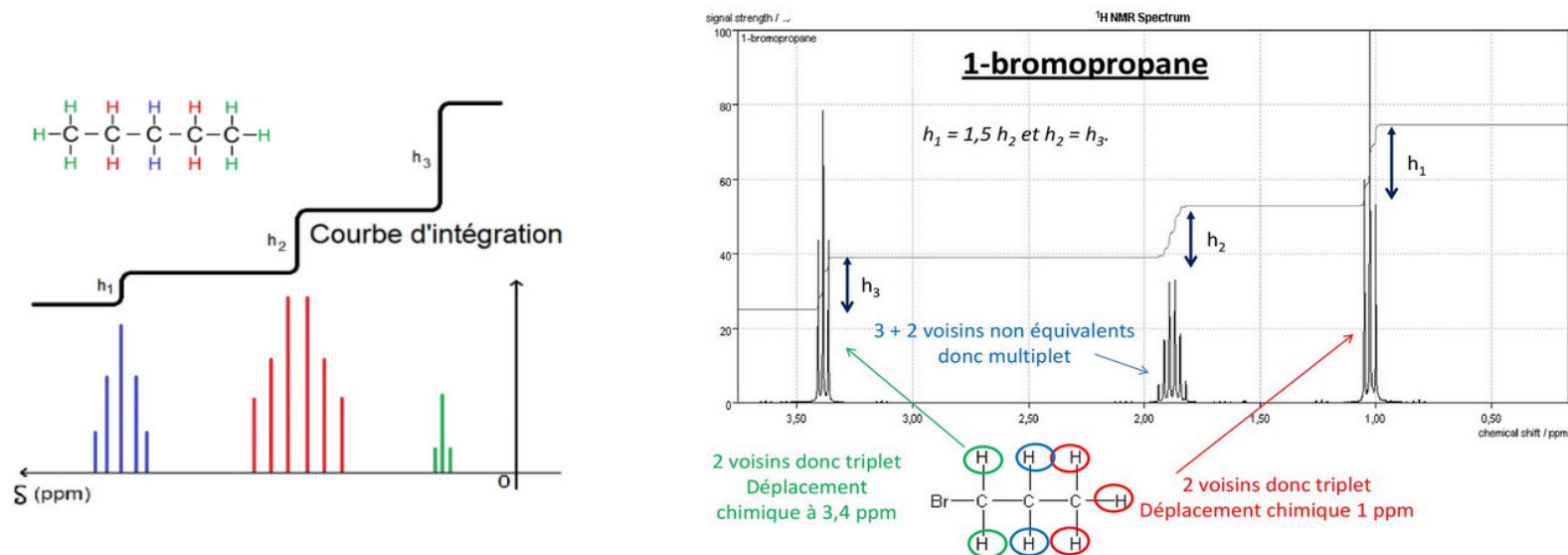


## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Analyse du spectre RMN $^1\text{H}$

#### La courbe d'intégration

Dans le spectre RMN, l'intensité des pics est proportionnelle au nombre de protons équivalents entrant en résonance. Ces pics pouvant être des singulets comme des multiplets, le spectromètre peut, déterminer une courbe appelée courbe d'intégration prenant une forme de paliers successifs. L'aire sous chaque palier (associé à un pic donné) est alors proportionnelle au nombre de protons équivalents entrant en résonance. Une molécule a trois groupes de protons équivalents (ci-dessous). Le groupe bleu a 2 protons équivalents ; le groupe rouge a 4 protons équivalents (c'est-à-dire 2 fois plus que le groupe bleu), et le groupe vert a 6 protons équivalents (3 fois plus que le groupe bleu). Dans ce cas, la courbe d'intégration va monter à une certaine hauteur au niveau du signal bleu, elle va monter 2 fois plus au niveau du signal rouge, et 3 fois plus au niveau du signal vert.



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### • Comment utiliser la courbe d'intégration ?

$$h_1 / h_2 = 3$$

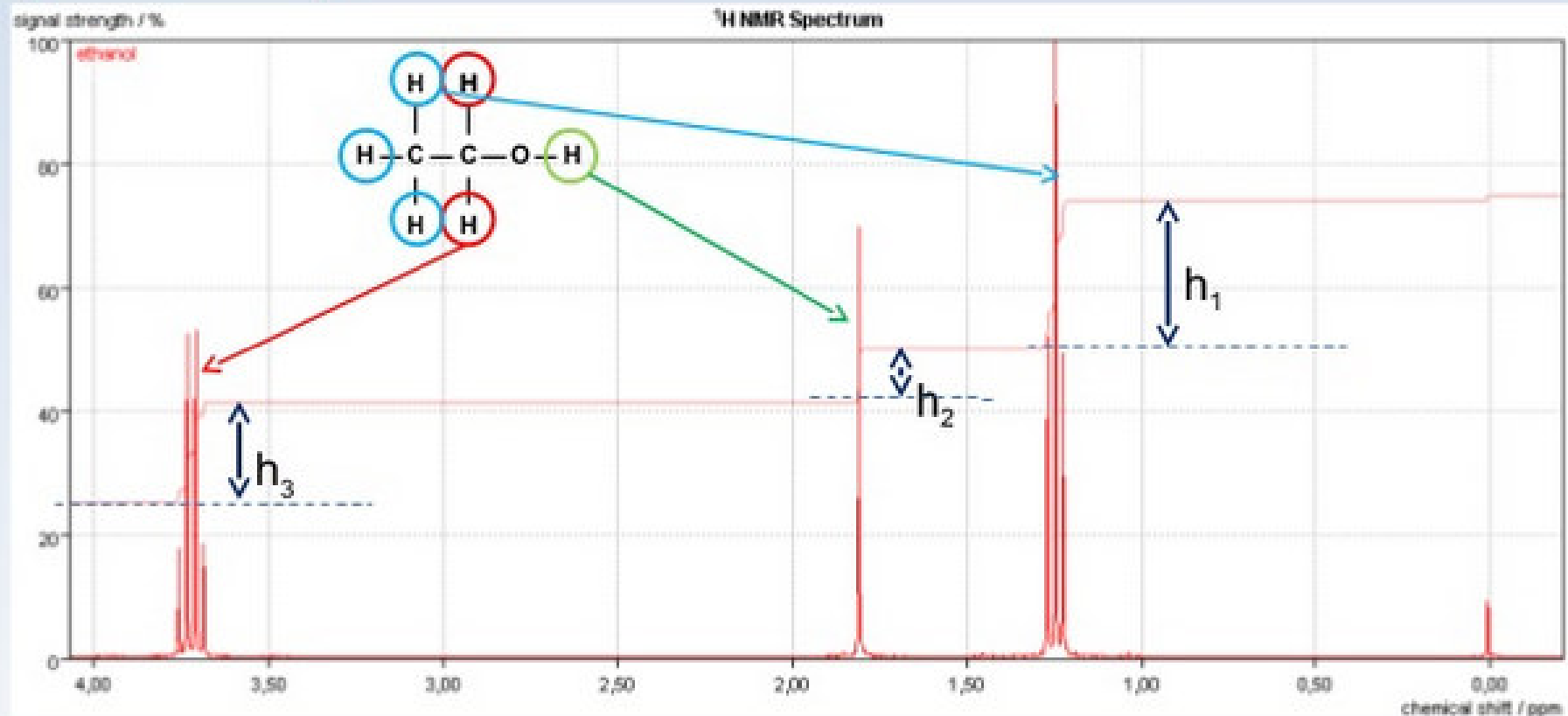


3 protons **H** pour 1 proton **H**

$$h_3 / h_2 = 2$$



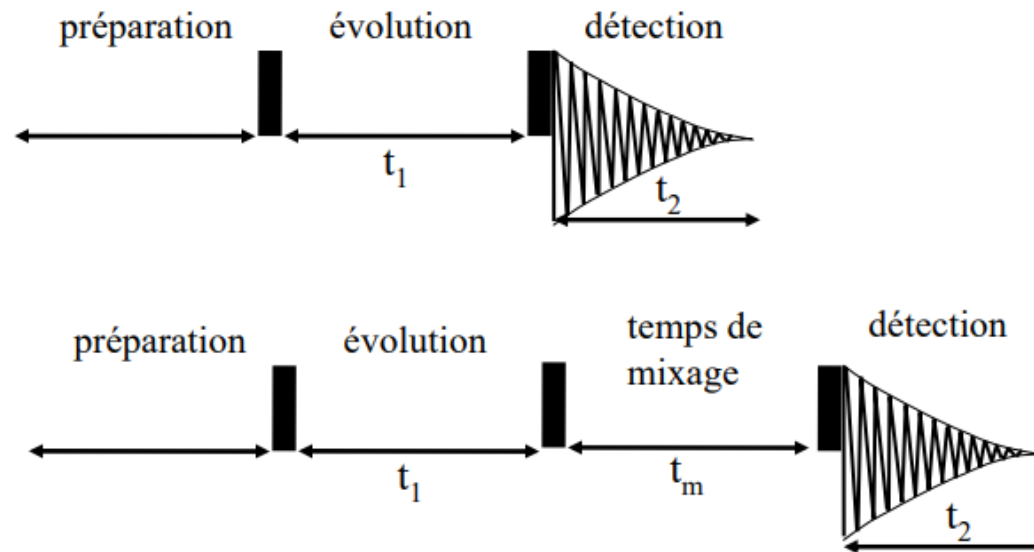
2 protons **H** pour 1 proton **H**



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### La RMN bidimensionnelle (2D)

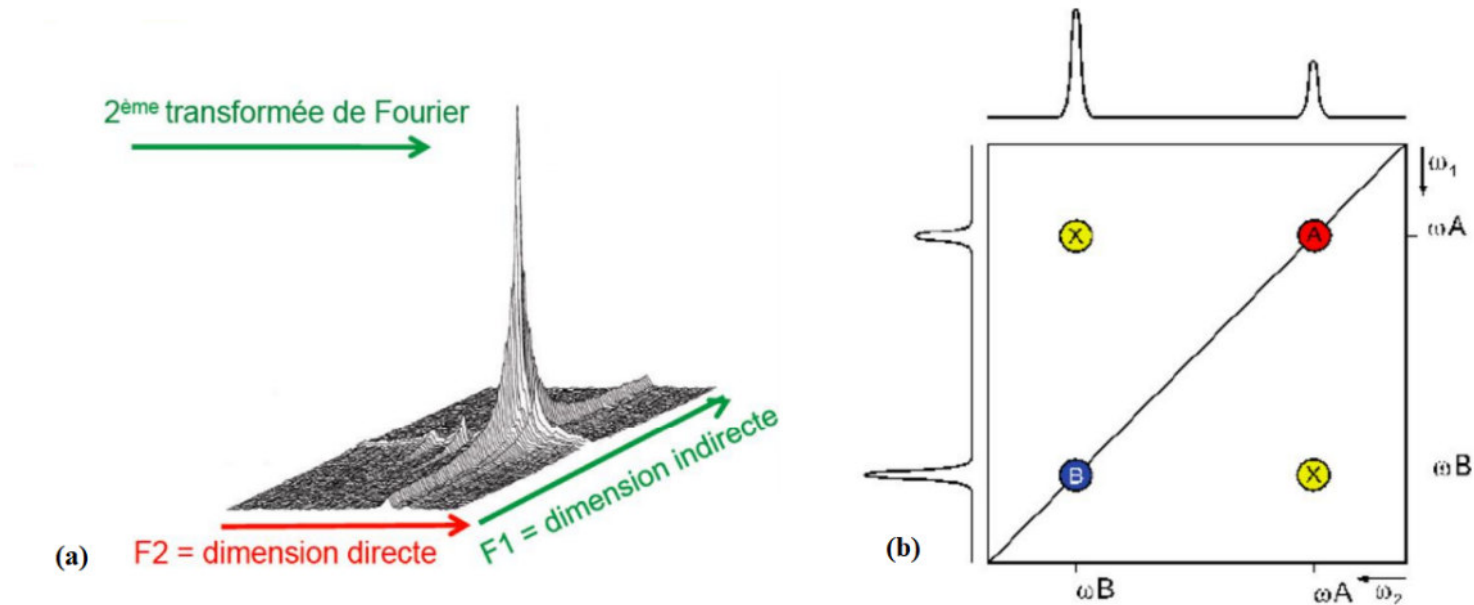
La RMN à deux dimensions (2D) est une technique plus efficace et précise que la RMN-1D, elle est très utilisée dans l'Analyse structurale des macromolécules, protéines, peptides, acides nucléiques. La RMN-2D appartient autant à la spectroscopie à transformée de Fourier qu'à celle à impulsion et repose sur une succession de trois intervalles de temps, préparation évolution et détection. Certain nombre d'expériences s'y ajoute encore une autre période avant la détection, le temps de mixage. Un spectre à deux dimensions (2D) est constitué de plusieurs spectres à une dimension (1D) acquis en variant un délai particulier ( $t_1$ ) dans une séquence d'excitation comprenant au moins deux impulsions.



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### La RMN bidimensionnelle (2D)

Le spectre RMN 2D peut être présentés sous deux formes, soit sous forme d'un spectre 3D avec deux axes correspondants aux fréquences  $f_1$  et  $f_2$  et le troisième représentant l'intensité des pics, soit un tracé en contour correspondant à la projection en 2D du spectre 3D.



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

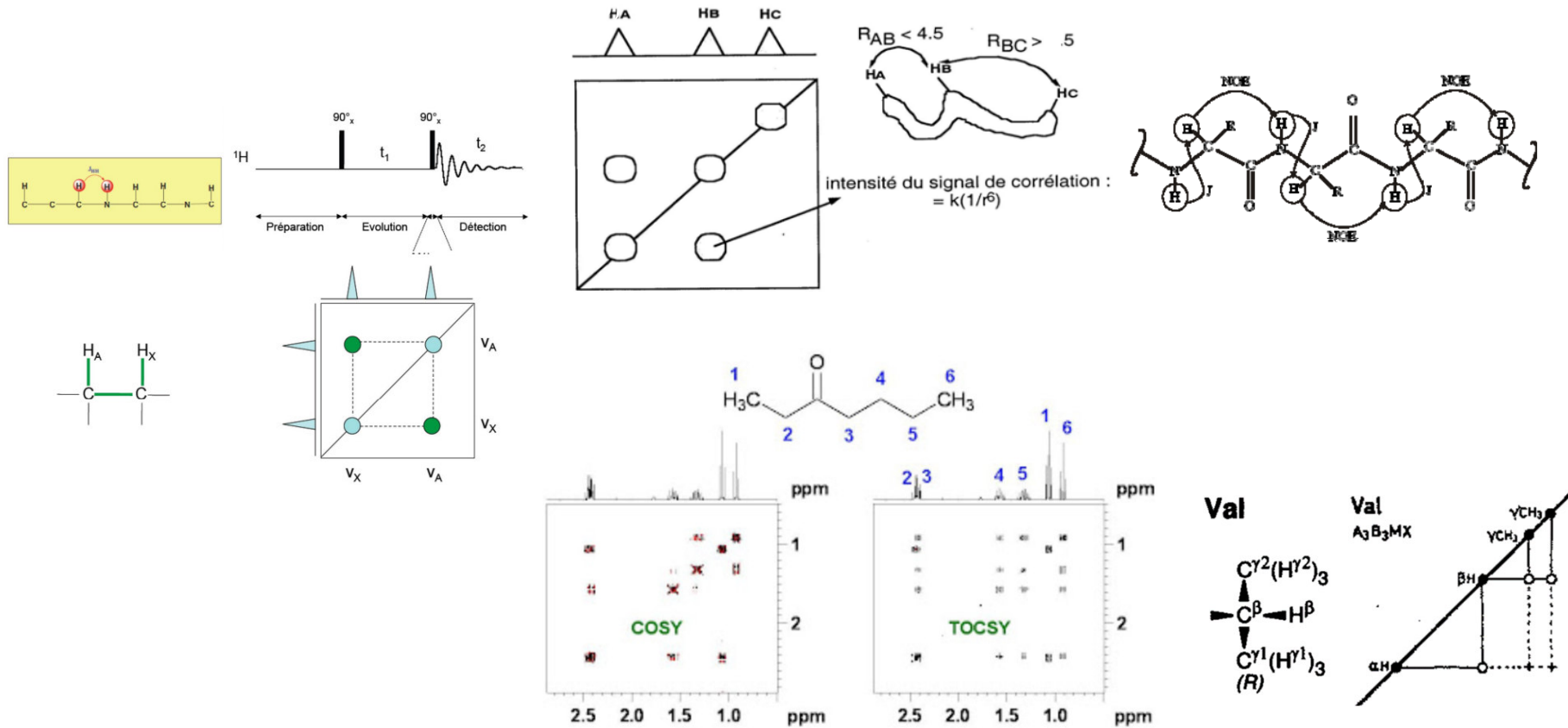
Les spectres RMN 2D de résolution permettent d'identifier les constantes de couplage entre deux spins. Ils comportent un axe correspondant au déplacement chimique d'un des deux spins (A par exemple) et un axe indiquant les fréquences de couplage. Les spectres RMN 2D de corrélation permettent de déterminer les corrélations entre les déplacements chimiques des différents spins qui sont couplés entre eux. On peut ainsi obtenir des spectres de corrélation homonucléaire ( $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$ ) ou hétéronucléaire ( $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$ ).

La corrélation des déplacements chimiques au travers des couplages scalaires homonucléaires peut être assurée par deux méthodes : **COSY** (Correlation Spectroscopy) permet de mettre en évidence les protons qui sont couplés de façon scalaire. On considère par exemple 2 protons A et X couplés en 3 J. Sur le spectre 2D, la diagonale correspond au spectre 1D et les tâches hors diagonale traduisent les corrélations  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  (**Figure**). **TOCSY** (Total Correlation Spectroscopy), appelé également **HOHAHA**, qui permet de mettre en évidence les systèmes de spins (ensemble de protons couplés de façon scalaire). La corrélation des déplacements chimiques au travers des couplages polaires homonucléaires couplage ( $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$ ) dans l'espace utilise la méthode **NOESY** (Nuclear Overhauser Effect Spectroscopy) Transfert de l'aimantation d'un spin à un autre proche dans l'espace via le couplage dipolaire. Effet NOE existe que si  $r < 5 \text{ \AA}$ .

La corrélation des déplacements chimiques au travers des couplages scalaires hétéronucléaires ( $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$ ) est assurée par les techniques : **HSQC** (Heteronuclear Single Quantum Correlation) met en évidence les couplages scalaires  $^1\text{J}_{\text{C-H}}$  ; **HMBC** (Heteronuclear Multiple Bond Correlation) met en évidence les couplages scalaires  $^2\text{J}_{\text{C-H}}$  et  $^3\text{J}_{\text{C-H}}$  (**Figure**). **HMQC** (Heteronuclear Multiple Quantum Correlation) consiste à l'étude des couplages scalaires directs  $^1\text{J}^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$

# 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

## La RMN bidimensionnelle (2D)



**Figure 38 :** RMN 2D COSY (a), TOCSY (b) et NOESY (c) de 2 noyaux homonucléaires ; RMN 2D COSY, TOCSY de 3-heptanone (d) RMN 2D COSY de la valine (e)



## 5- La Spectroscopie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)

### Applications de RMN

Les applications de la RMN sont diverses et incluent les domaines de recherche et industriels suivants :

- La biologie : cette technique est appliquée à l'étude des macromolécules (protéines, lipides et acides nucléiques) pour comprendre les voies biochimiques impliquées dans le métabolisme des acides aminés, des lipides et des glucides.
- La chimie : la RMN est largement utilisée pour des analyses qualitatives et quantitatives afin de suivre les réactions, d'identifier les structures et d'évaluer la pureté des échantillons.
- La médecine : l'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une application de la RMN permettant d'analyser les tissus mous afin d'identifier les tissus endommagés ou malades.
- L'industrie pharmaceutique : elle sert à déterminer la pureté et la quantité des principes actifs, des excipients et des impuretés dans les produits pharmaceutiques.
- L'industrie pétrolière : pour évaluer les hydrocarbures dans le pétrole brut et dans ses produits.