

Spectroscopies

Plan du cours

Spectroscopies	1
Introduction	2
I. Principe de la spectroscopie	2
II. Spectroscopie UV-visible	3
II.1 Description de l'interaction et allure des spectres	3
II.2 Effet bathochrome	5
II.3 Loi de BEER-LAMBERT	6
III. Spectroscopie infrarouge	7
III.1 Allure des spectres	7
III.2 Modélisation	7
III.2.a Molécules diatomiques	7
III.2.b Molécules polyatomiques	8
III.3 Application à la caractérisation de fonctions	8
III.4 Paramètres d'influence	8
IV. Spectroscopie de résonance magnétique du proton	10
IV.1 Principe	10
IV.2 Déplacement chimique	11
IV.3 Paramètres d'influence	12
IV.3.a Influence de l'électronégativité et de groupes électroattracteurs	12
IV.3.b Protons acides	13
IV.4 Allure d'un spectre	13
IV.4.a Équivalence chimique	13
IV.4.b Intégration	15
IV.4.c Multiplicité	16
Synthèse	19

Introduction

Lors de la synthèse d'une nouvelle molécule, il est nécessaire de vérifier si le produit de la réaction correspond à la molécule escomptée. Jusqu'au milieu du XX^e siècle, les seules méthodes d'analyse des composés chimiques étaient l'**analyse élémentaire** (qui donne la formule brute), la mesure de **masse molaire** (par cryométrie par exemple) et les **tests caractéristiques** qualitatifs (généralement peu précis et destructifs).

L'avènement de la **spectroscopie UV-visible**, de la **spectroscopie infrarouge** (IR) et surtout de la **résonance magnétique nucléaire** (RMN) a permis d'accéder rapidement et très précisément à la structure des molécules.

I. Principe de la spectroscopie

Le principe de la spectroscopie repose sur l'étude de la réponse d'une espèce chimique après interaction avec une onde électromagnétique, donc avec la **lumière**.

L'**interaction lumière-matière** peut alors fournir des informations précieuses sur la structure de la matière sondée.

Propriété : quantification de l'énergie

L'énergie d'une molécule est **quantifiée** : elle ne peut prendre que des **valeurs discrètes** bien définies.

Ainsi, la molécule en passant d'un état énergétique à un autre peut émettre ou absorber un photon d'énergie ΔE selon la relation de PLANCK-EINSTEIN.

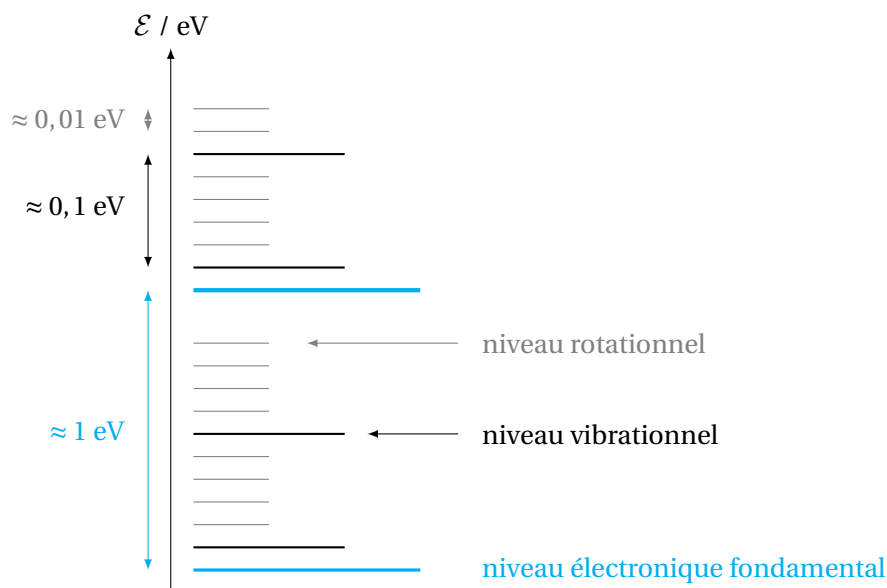
Propriété : relation de Planck-Einstein (rappel)

La **dualité onde-corpuscule** se traduit par la relation de PLANCK-EINSTEIN :

$$\Delta \mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

- $\Delta \mathcal{E}$ l'écart énergétique entre les deux niveaux de la transition (en J) ;
- $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ la constante de PLANCK ;
- ν la fréquence de l'onde électromagnétique absorbée ou émise (en Hz ou s^{-1}) ;
- $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ la célérité de la lumière dans le vide ;
- λ la longueur d'onde de l'onde électromagnétique absorbée ou émise (en m).

Selon la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique mis en jeu, des transitions énergétiques sont observées entre niveaux **électroniques**, **vibrationnels** ou **rotationnels**.



L'énergie totale de la molécule peut alors s'écrire de la façon suivante :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{électronique}} + \mathcal{E}_{\text{vibrationnelle}} + \mathcal{E}_{\text{rotationnelle}}$$

● **Remarque** : en présence d'un champ magnétique, il existe aussi des **transitions entre état de spin nucléaire**.

Ainsi, grâce à la relation de PLANCK-EINSTEIN, il est possible d'adapter la longueur d'onde λ du rayonnement électromagnétique afin de sonder les différentes transitions au sein de la molécule.

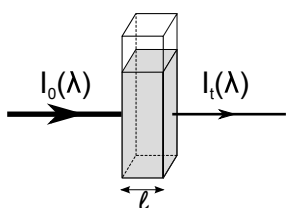
transition	ordre de grandeur énergétique	domaine de longueur d'onde	domaine spectral
électroniques	$\Delta\mathcal{E}_{\text{él}} \approx 15 \text{ eV à } 250 \text{ eV}$	50 à 800 nm	UV-visible
vibrationnels	$\Delta\mathcal{E}_{\text{vib}} \approx 0,5 \text{ eV à } 5 \text{ eV}$	2,54 à μm	IR
rotationnels	$\Delta\mathcal{E}_{\text{rot}} \approx 10^{-3} \text{ eV}$	20 à 2,5 mm	micro-ondes

II. Spectroscopie UV-visible

II.1 Description de l'interaction et allure des spectres

En spectroscopie UV-visible, les molécules sont **en solution**, souvent en solution aqueuse. Pour ce type de spectroscopie, le rayonnement incident est dans la gamme UV-visible.

Pour tracer un spectre d'absorbance, un spectrophotomètre est utilisé. Un rayonnement électromagnétique incident, d'intensité $I_0(\lambda)$, traverse l'échantillon de solution de largeur ℓ . Le rayonnement transmis est capté à la sortie de l'échantillon et son intensité $I_t(\lambda)$ est mesurée.



- $I_0(\lambda)$: intensité du rayonnement **incident** ;
- $I_t(\lambda)$: intensité du rayonnement **transmis**.

Définition : transmittance absorbance

La **transmittance** est une grandeur sans unité correspondant au rapport entre l'intensité du rayonnement transmis et l'intensité du rayonnement incident.

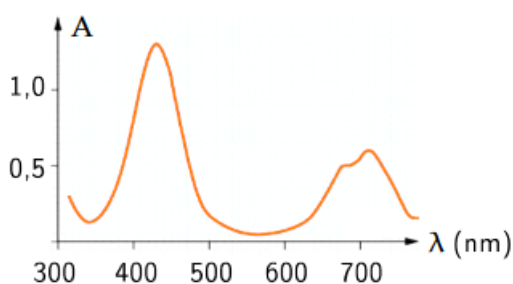
$$T = \frac{I_t(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

L'**absorbance** est reliée à la transmittance par la relation :

$$A_\lambda = -\log(T) = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I_t(\lambda)}\right)$$

Le spectre d'absorption correspond au tracé de l'absorbance A_λ en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Exemple : spectre d'absorption d'une solution aqueuse de nitrate de nickel (II) à $0,25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ dans une cuve de trajet optique $\ell = 1 \text{ cm}$.

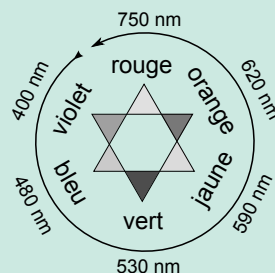
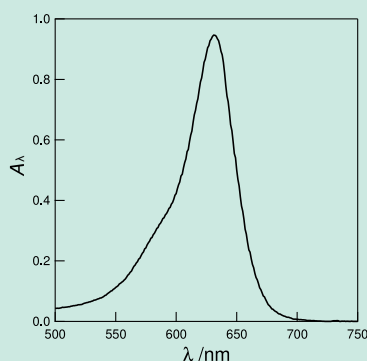


Propriété : couleur du rayonnement absorbé

La **couleur de la solution** est la **couleur complémentaire** de celle qui correspond à la longueur d'onde du **maximum d'absorption** sur le spectre.

Application 1 : couleur d'une solution

Le spectre d'absorption d'une solution aqueuse de bleu brillant (colorant alimentaire E133) de concentration en quantité de matière $c = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ est présenté ci-après.



À l'aide du spectre et du cercle chromatique fourni, déterminer la couleur de la solution.

.....

.....

.....

.....

.....

Remarque : sur un spectre, des **bandes** d'absorption sont observées et non des **pics**. Cela est dû, entre autres, à des transitions rotationnelles et vibrationnelles qui ont lieu au sein du niveau électronique excité peuplé.

II.2 Effet bathochrome

Propriété : effet bathochrome

Plus une entité chimique est **conjuguée**, plus la longueur d'onde de son maximum d'absorption est élevée et se rapproche du **visible** en se **décalant vers le rouge**.

Exemple :

entité chimique	$\lambda_{\text{max}} / \text{nm}$	couleur
	519	rouge
	625	bleu
	735	vert

II.3 Loi de Beer-Lambert

Propriété : loi de Beer-Lambert

La loi de BEER-LAMBERT permet de relier quantitativement l'absorbance A_λ à la concentration en quantité de matière des espèces absorbantes en solution dans le cas de solutions diluées :

$$A_\lambda = \sum_i \varepsilon_i(\lambda) \ell c_i$$

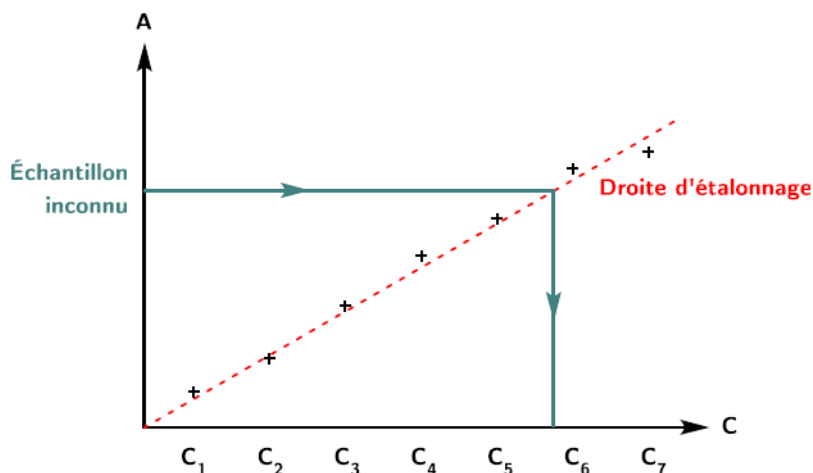
avec :

- $\varepsilon_i(\lambda)$ le coefficient d'extinction molaire de l'espèce i à la longueur d'onde λ (en $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) ;
- ℓ la longueur de la cuve (en cm) ;
- c_i la concentration en quantité de matière de l'espèce i (en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$).

🗨 **Remarque** : la loi de BEER-LAMBERT ne peut pas s'appliquer à toutes les solutions. En particulier :

- la linéarité n'est valable que pour des **absorbances pas trop élevées** (le détecteur du spectrophotomètre peut saturer) ;
- la **concentration des espèces ne doit pas être trop élevée** pour ne pas que les espèces forment des agrégats entre elles.

L'une des principales utilisation de la loi de BEER-LAMBERT est de pouvoir doser une espèce chimique par étalonnage. Puisque l'absorbance est proportionnelle à la concentration, alors à une longueur d'onde fixée, le tracé de $A_\lambda = f(c_i)$ avec c_i la concentration en quantité de matière d'une espèce i donne une droite.

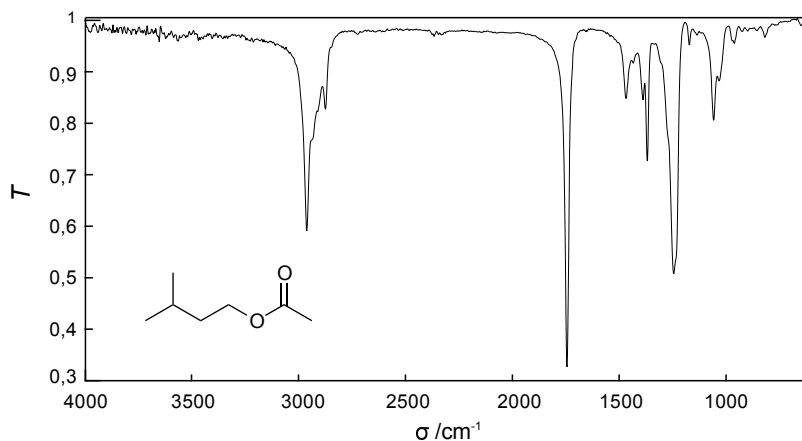


III. Spectroscopie infrarouge

III.1 Allure des spectres

Le spectre infrarouge (IR) correspond au tracé de la **transmittance** T_λ , grandeur sans dimension définie par $T_\lambda = \frac{I_t(\lambda)}{I_0(\lambda)}$, en fonction du **nombre d'onde** (cm^{-1}) $\sigma = 1/\lambda = \nu/c$.

Exemple :

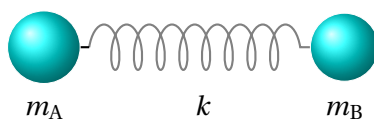


III.2 Modélisation

Le spectroscopie infrarouge est une spectroscopie de **vibration** de liaisons chimiques. Chaque liaison chimique répond différemment à la sollicitation énergétique d'un rayon lumineux.

III.2.a Molécules diatomiques

La vibration au sein d'une molécule A-B est décrite par un modèle « masses - ressort ». Les atomes sont modélisés par les masses m_A et m_B et la liaison par un ressort de **constante de raideur** k , d'autant plus grande que la liaison A-B est forte.



Propriété : loi de Hooke

Le nombre d'onde de vibration est donné par la **loi de Hooke**.

$$\sigma = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

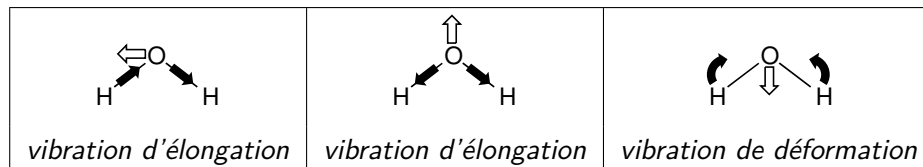
où μ est la masse réduite telle que $\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B}$

Quand le nombre d'onde du rayonnement incident σ correspond au nombre d'onde de vibration de la liaison σ_0 , il y a absorption. Une **bande de vibration** correspondant à une transmittance inférieure à 1 apparaît pour ce nombre d'onde.

III.2.b Molécules polyatomiques

Pour une molécule diatomique, la seule vibration possible est l'élongation de la liaison. Pour une molécule **polyatomique**, les longueurs et les angles peuvent varier lors de sa déformation. La molécule possède plusieurs **modes de vibration** pouvant conduire à plusieurs bandes de vibration.

Exemple :



III.3 Application à la caractérisation de fonctions

La spectroscopie infrarouge est de grande utilité à la fin d'une synthèse organique lorsqu'il s'agit d'identifier un produit de synthèse. Pour cela, il existe des régions du spectre caractéristiques en terme de nombres d'onde et qui permettent de détecter la présence de certains groupes caractéristiques.

Région $4000\text{ cm}^{-1} - 1400\text{ cm}^{-1}$

Cette région correspond globalement aux **vibrations d'élongation des liaisons**.

Son analyse est souvent aisée car elle contient relativement peu de signaux et l'attribution des bandes d'élongation permet souvent **d'identifier les groupes fonctionnels d'une molécule**.

bande d'élongation	allure	ordre de grandeur de σ / cm^{-1}
C-H	fine	3000
O-H (alcool)	large	3400
N-H (amine)	variable	3400
O-H (acide carboxylique)	très large	2950
C=O	fine et intense	1725
C=C	fine et peu intense	1660

Région $1400\text{ cm}^{-1} - 400\text{ cm}^{-1}$ « empreinte digitale » des molécules

Cette région est difficile à exploiter directement car elle contient beaucoup de bandes, en particulier des bandes de déformation. Elle peut néanmoins être analysée à l'aide de logiciels qui comparent ses bandes à celles des produits d'une **base de données**. Cela peut permettre d'identifier la molécule.

III.4 Paramètres d'influence

Le nombre d'onde σ du rayonnement absorbé est proportionnel à $\sqrt{k/\mu}$.

- σ augmente avec la **multiplicité des liaisons** car la force de la liaison augmente.

✍ Application 2 : influence de la multiplicité de la liaison

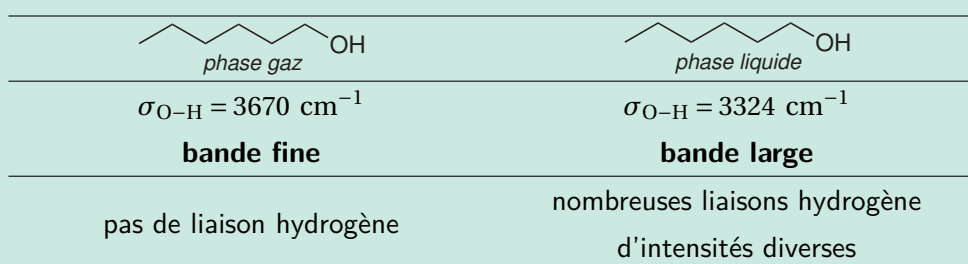
✎ Expliquer les résultats suivants.



- σ diminue avec la **formation de liaisons hydrogène** car la force de la liaison diminue.

✍ Application 3 : influence de la multiplicité de la liaison

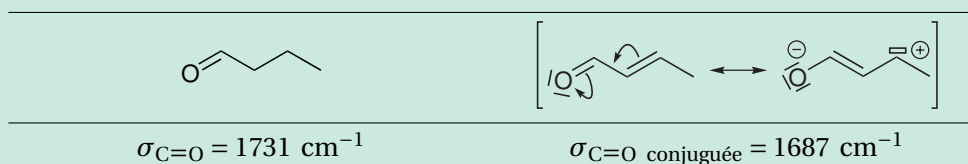
✎ Expliquer les résultats suivants.



- σ diminue avec la **conjugaison** car la force de la liaison diminue.

✍ Application 4 : influence de la multiplicité de la liaison

✎ Expliquer les résultats suivants.



IV. Spectroscopie de résonance magnétique du proton

La spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN) a été développée à partir des travaux de BLOCH et PURCELL (Prix NOBEL en 1952). Cette spectroscopie repose sur l'application d'un champ magnétique sur un échantillon permettant l'excitation des **spins nucléaires**. Cette excitation se fait dans le domaine des **ondes radios**.

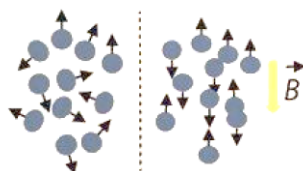
IV.1 Principe

Les propriétés magnétiques d'un noyau, composé de protons et neutrons, sont représentées par des **spins nucléaires**. Ils peuvent être modélisés par des **barreaux aimantés**.

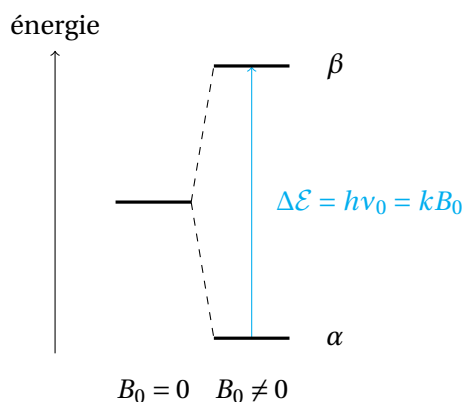
Sans champ magnétique, les **spins** sont orientés de manière aléatoire et ont tous la même énergie.

Lorsqu'un champ magnétique extérieur $\vec{B}_0$ est appliqué, les barreaux aimantés peuvent s'orienter de deux façons :

- **parallèlement** au champ magnétique et **dans le même sens**. La configuration est stable et son énergie associée $\mathcal{E}_\alpha$ est faible.
- **parallèlement** au champ magnétique mais **dans le sens contraire**. La configuration est instable et son énergie associée $\mathcal{E}_\beta$ est plus grande.



Ces spins peuvent donc être séparés en deux populations avec deux énergies différentes. On dit que les états sont non **dégénérés** / **discrets**.



La valeur du spin nucléaire dépend de la composition du noyau. Dans le cas du proton, le **spin nucléaire est égal à 1/2**. Ainsi, suivant cette composition (nombre de protons et de neutrons), chaque atome possède une fréquence de résonance bien spécifique permettant la transition des spins de l'état le plus stable vers l'état le moins stable. Cette fréquence est appelée la **fréquence de LARMOR** ou fréquence de résonance, souvent notée ν_0 .

L'écart énergétique entre les deux niveaux vaut donc :

$$\Delta\mathcal{E} = h\nu_0$$

🗨 **Remarques :**

- Le spin varie d'un numéro atomique à un autre mais pour un nombre de nucléons différents (isotopes).
- Un atome n'est pas sondable en RMN si pour un atome A_ZX , $A+Z$ est pair. (Le carbone 12 ne peut donc pas être sondé !)

Pour cette spectroscopie, c'est la **relaxation** des spins après l'excitation de l'état excité vers l'état fondamental qui est suivie. Un atome résonne à la fréquence de LARMOR seulement s'il est **isolé**. En effet, la fréquence de résonance dépend aussi de l'environnement électronique de l'atome sondé. Effectivement, au sein d'une molécule, chaque proton a un environnement électrique différent suivant les liaisons et les atomes qui l'entourent..

Cette environnement agit comme un **écranage électromagnétique** donc l'atome va ressentir un champ magnétique diminué. Cela modifie légèrement la fréquence de résonance pour chaque atome de la molécule. On définit alors une constante d'écran σ_i pour un atome i qui dépend de l'environnement électronique de cet atome.

La fréquence de résonance de l'atome i a pour expression :

$$\nu_i = \nu_0 (1 - \sigma_i)$$

Ainsi, plus σ_i est grand, plus le proton est **protégé** du champ magnétique B_0 (on parle alors de proton déblindé) donc plus la fréquence de résonance du proton est **grande**.

IV.2 Déplacement chimique

À notre niveau (classes préparatoires), seule la spectroscopie de RMN du proton est étudiée.

Un spectre de RMN 1H est composé de **pics**, ayant pour abscisse le **déplacement chimique** et en ordonnée l'**intensité** du signal.

Définition : déplacement chimique

Le déplacement chimique d'un proton, noté δ_i est défini par :

$$\delta_i = \frac{\nu_i - \nu_{\text{réf}}}{\nu_0} \times 10^6$$

avec :

- ν_0 la fréquence de travail de l'appareil (en Hz) ;
- $\nu_{\text{réf}}$ la fréquence de résonance d'une molécule de référence ^a (en Hz).

Unité : le déplacement chimique est de dimension 1 (pas d'unité) mais s'exprime en **partie par million** (ppm).

^a. Souvent, la molécule de référence est le tétraméthylsilane (TMS).

Remarques :

- Un déplacement chimique n'est pas forcément positif : tout dépend de la référence !
- Plus le déplacement chimique est grand, plus le proton considéré est dit **déblindé**.
- Les fréquences de travail utilisées varient entre 200 MHz et 1 GHz.

IV.3 Paramètres d'influence

IV.3.a Influence de l'électronégativité et de groupes électroattracteurs

Propriété : densité électronique et blindage

Plus la **densité électronique** est faible autour d'un proton, plus σ_i est petit. Le proton ressent alors un champ magnétique B_i plus élevé. On dit qu'il est **plus déblindé**.

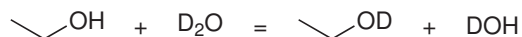
Ainsi, un proton à proximité d'un **atome électronégatif** (N, O, Cl, ...) ou d'un **groupe électroattracteur** ($-\text{C}(=\text{O})-\text{Z}$, $-\text{C}\equiv\text{N}$, ...) possède une constante de blindage σ_i faible et donc un **déplacement chimique δ_i élevé**.

proximité...	constante de blindage σ_i	déplacement chimique δ_i
... d'un atome électronégatif (N, O, Cl, ...)	faible	élevé
... d'un groupe électroattracteur ($-\text{C}(=\text{O})-\text{Z}$, $-\text{C}\equiv\text{N}$, ...)		

IV.3.b Protons acides

Les protons **acides** (d'alcool ou d'amine par exemple) s'échangent rapidement entre molécules. Ils n'ont **pas de déplacement chimique caractéristique** et leur signal est parfois **élargi**.

De plus, des protons acides peuvent être facilement identifiés car **leur signal disparaît** lorsque de l'**eau deutérée** D_2O est ajoutée à l'échantillon. Cela est dû à la réaction d'échange avec le deutérium de D_2O . En effet, le deutérium ne résonne pas aux mêmes fréquences que le proton.



Remarque : la force des liaisons hydrogène intermoléculaires, la température, le solvant et la dilution influent fortement sur la position et la largeur du signal des protons acides.

IV.4 Allure d'un spectre

IV.4.a Équivalence chimique

Lorsque des protons possèdent le **même environnement chimique**, ils résonnent à la même fréquence et sont dits **chimiquement équivalents**.

Définition : équivalence chimique

Deux protons sont **chimiquement équivalents** (ou **isochrones**), s'ils sont **échangeables par une opération de symétrie** ou une **rotation autour d'un axe** laissant la molécule inchangée. Ils ont alors le **même déplacement chimique**.

Exemples :

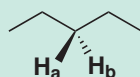
Méthode 1 : déterminer si deux protons sont chimiquement équivalents

1. Dessiner la molécule M_1 obtenue en substituant H_a par un deutérium D. Faire de même avec H_b pour obtenir la molécule M_2 .
2. Déterminer la relation d'isomérisie existant entre les molécules M_1 et M_2 .
 - si M_1 et M_2 sont **identiques**, H_a et H_b sont **chimiquement équivalents** ;
 - si M_1 et M_2 sont **énantiomères** (images l'une de l'autre dans un miroir plan), H_a et H_b sont **chimiquement équivalents** ;
 - si M_1 et M_2 sont **diastéréoisomères** (non images l'une de l'autre dans un miroir plan), H_a et H_b ne sont **pas chimiquement équivalents**.

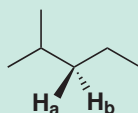
✍ Application 5 : protons chimiquement équivalents

🔗 Pour chacune des molécules suivantes, déterminer si les protons H_a et H_b sont chimiquement équivalents ou non.

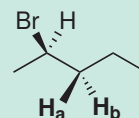
1.



2.



3.



Propriété : équivalence chimique et pics

Tous les **protons équivalents** d'une molécule ne donnent qu'un **seul et même signal** sur un spectre RMN ^1H .

IV.4.b Intégration

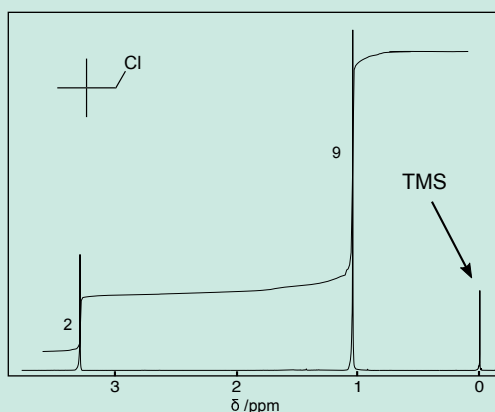
Propriété : intégration d'un signal

Pour chaque signal d'un spectre RMN ^1H , l'**aire sous un signal** est proportionnelle au **nombre de protons chimiquement équivalents**.

Ainsi, la **courbe d'intégration** superposée au spectre permet de déterminer quantitativement les proportions des différents protons chimiquement équivalents.

Application 6 : interprétation d'un spectre RMN ^1H

 En s'appuyant sur la courbe d'intégration, interpréter le spectre RMN ^1H suivant.

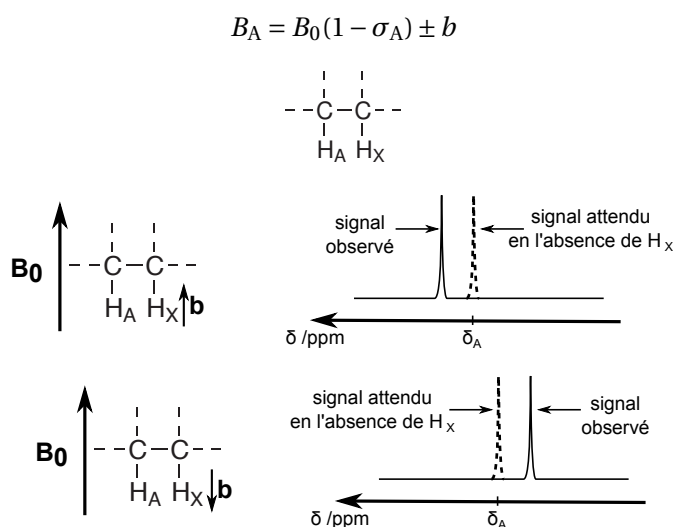


IV.4.c Multiplicité

Parfois, le signal d'un groupe de protons chimiquement équivalents n'apparaît pas sous la forme d'un unique pic à δ_i mais sous la forme d'un ensemble de pics centrés sur δ_i , appelé **multiplet**. Cette démultiplication du signal est due à une interaction magnétique entre les spins nucléaires appelée **couplage spin-spin**.

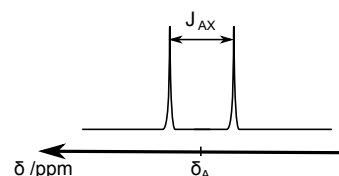
- *Système AX*

Le spin nucléaire de H_X peut prendre les deux états de spin, α ou β . Le proton H_A ressent alors le champ $\vec{B}_0$ appliqué par l'appareil modifié par les effets locaux de blindage ou de déblindage des électrons et par le champ $\vec{b}$ dû au spin nucléaire de H_X .



Le proton H_A résonne donc pour **deux fréquences différentes** selon l'orientation du spin de H_X .

Son signal est alors constitué de deux pics (**doublet**) placés symétriquement autour de la valeur du déplacement chimique en l'absence de couplage.



Définition : constante de couplage

La **constante de couplage J** entre deux protons correspond à l'écart, exprimé en **hertz**, entre les deux pics. Elle est indépendante de la valeur du champ B_0 .

Remarque :

Pour déterminer la valeur d'une constante de couplage à partir d'un spectre RMN 1H , il suffit de multiplier la **différence de déplacement chimique $\Delta\delta$** (ppm) entre les deux pics par la **fréquence de résonance ν_0** (MHz) du spectromètre utilisé.

$$J(\text{Hz}) = \nu_0(\text{MHz}) \times \Delta\delta(\text{ppm})$$

- *Système A_mX_p*

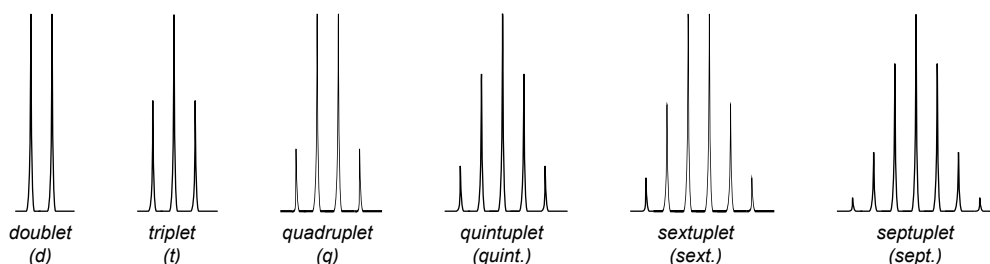
Le raisonnement précédent peut se généraliser à tout système du type A_mX_p où m protons équivalents H_A sont couplés à p protons équivalents H_X .

Propriété : règle du $(p+1)$ -uplet

Le signal d'un groupe de protons équivalents H_A couplé avec p protons équivalents H_X apparaît sous la forme d'un **$(p+1)$ -uplet** dont les intensités relatives des pics sont données par le **triangle de Pascal**.

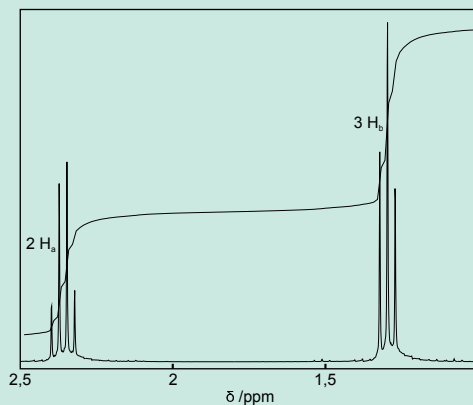
L'écart entre les pics correspond à la **constante de couplage** J_{AX}

		1		
	1	2	1	
1	3	3	1	
1	4	6	4	1



Application 7 : interprétation d'un spectre RMN 1H

Interpréter le spectre RMN 1H du propanenitrile $CH_3-CH_2-C\equiv N$ suivant.



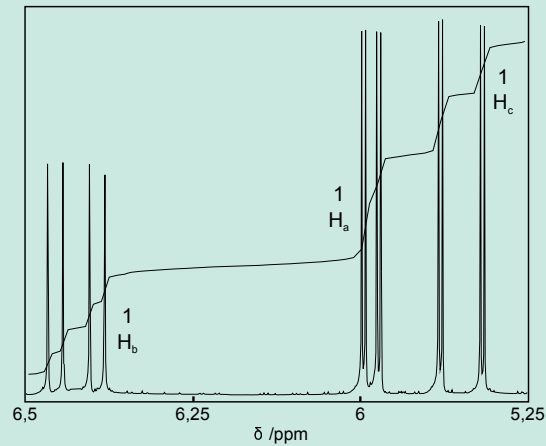
- *Système $A_m M_p X_q$*

Le signal d'un groupe de protons équivalents H_A couplé avec p protons équivalents H_M et q protons équivalents H_X apparaît sous la forme :

- * d'un **($p+1$)-uplet de ($q+1$)-uplets** ou d'un **($q+1$)-uplet de ($p+1$)-uplets** si $J_{AM} \neq J_{AX}$;
- * d'un **($p+q+1$)-uplet** si $J_{AM} = J_{AX}$.

Application 8 : interprétation d'un spectre RMN ^1H

 Interpréter le spectre RMN ^1H du bromure de vinyle $\text{CH}_2=\text{CHBr}$ suivant.



SYNTHÈSE

Les « savoirs »

- ✎ Définir le concept de quantification de l'énergie.
- ✎ Énoncer la relation de PLANCK-EINSTEIN.
- ✎ Définir l'absorbance. Définir la transmittance.
- ✎ Expliquer le lien entre la longueur d'onde maximale du spectre d'absorption d'une solution et la couleur de la solution aqueuse.
- ✎ Définir l'effet bathochrome.
- ✎ Énoncer la loi de BEER-LAMBERT.
- ✎ Définir le déplacement chimique.
- ✎ Expliquer le lien entre la densité électronique et le blindage du proton.
- ✎ Définir l'équivalence chimique.
- ✎ Expliquer le lien entre l'équivalence chimique et les signaux d'un spectre.
- ✎ Expliquer le lien entre le nombre de protons d'un signal et l'intégration de ce signal.
- ✎ Définir la constante de couplage.
- ✎ Énoncer la règle du $(p + 1)$ -uplet.

Les « savoir-faire »

- ✎ Niveaux d'énergie dans une molécule : description des différents niveaux et des ordres de grandeurs énergétiques dans la molécule.
- ✎ Spectroscopie UV-visible : principe, domaine énergétique, loi de BEER-LAMBERT, couleur d'une solution.
- ✎ Spectroscopie infrarouge : domaine énergétique, principe, loi de HOOKE et description du modèle du ressort.
- ✎ Paramètres d'influence en spectroscopie infrarouge.
- ✎ Spectroscopie RMN ^1H : principe, déplacement chimique, paramètres intéressants dans un spectre RMN ^1H .