

L3P Métrologie Chimique et Nucléaire  
UE XLP5CE034 : spectroscopies

# Spectroscopie de vibration infrarouge

M. Le Guennec - Maître de Conférences  
Département de Chimie

## I- Introduction

$$E_{\text{molécule}} = E_{\text{électronique}} + E_{\text{vibrationnelle}} + E_{\text{rotationnelle}}$$

liée aux différentes orbitales contenant les électrons périphériques de la molécule

↓  
domaine UV-visible  
10 - 800 nm

liée aux vibrations de tous les atomes de la molécule

↓  
domaine infrarouge  
proche IR 0,8 - 2,5  $\mu\text{m}$   
moyen IR 400 - 4000  $\text{cm}^{-1}$

liée à la rotation de la molécule autour de son centre de gravité

↓  
domaines IR lointain 10 - 400  $\text{cm}^{-1}$   
et micro-ondes (du cm au mm)

**Attention !** toutes les molécules absorbent dans le domaine infrarouge  
mais toutes ne sont pas observables par spectroscopie infrarouge

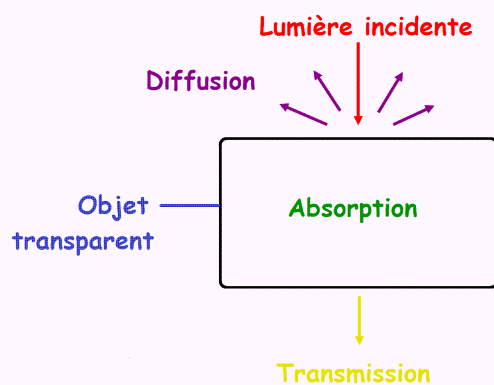
ex. CO, HCl, etc, observables  
O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, etc, non observables

→ spectroscopie d'absorption infrarouge

→ spectroscopie de diffusion Raman

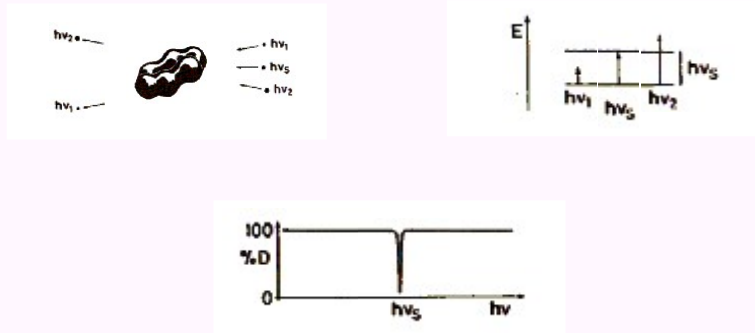


Interactions Rayonnement – Matière :

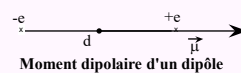


## I.1- Spectroscopie d'absorption infrarouge

### A- Principe :



### B- Propriété électrique moléculaire concernée : le moment dipolaire



Moments dipolaires (D) de quelques liaisons :

H-C	H-N	H-O	H-S	C-Cl	N-O
0.4	1.31	1.51	0.7	1.47	0.15
C-N	C=N	C≡N	C-O	C=O	C-S
0.45	1.4	3.1	0.7	2.4	0.9
					C=S
					2.0

$$\vec{\mu}_{\text{molécule}} = \sum_i q_i \vec{r}_i$$

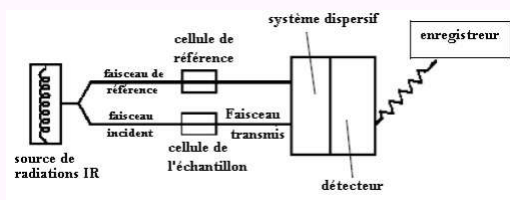
Moments dipolaires (D) de quelques molécules en phase gazeuse :

HCl	NaCl	CO	CS	OCS	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>
1.07	8.5	0.11	1.97	0.71	0.58	1.62
H <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>		
1.94	1.69	3.91	2.93	1.47		

se détermine expérimentalement ←  
partir de mesures effectuées à l'aide  
d'un réfractomètre et dipolemètre

## C- Appareillage

### ➤ Les spectromètres dispersifs

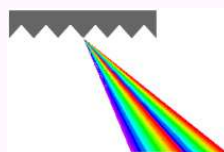
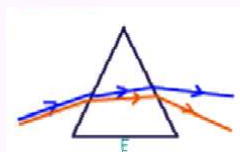


#### ✓ source :

- thermiques : global ou filament de Nernst ou filament de Nichrome pour le MIR, lampes QTH (quartz tungstène halogène) pour le PIR, lampe à vapeur de mercure ou synchrotron pour l'IR lointain

- lumineuses : diodes DEL

✓ élément dispersif = prisme en NaCl (jsq  $650\text{ cm}^{-1}$ ) ou KBr (jsq  $400\text{ cm}^{-1}$ ) ou réseaux de diffraction

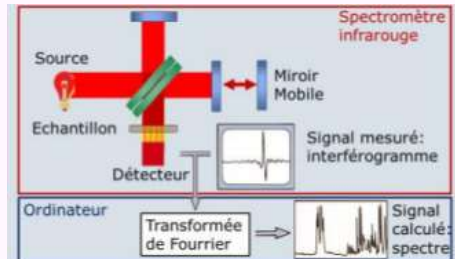


✓ détecteurs = thermocouples

#### Inconvénients des appareils dispersifs :

- lenteur des mesures
- sensibilité limitée et insuffisante à l'heure actuelle
- complexité mécanique

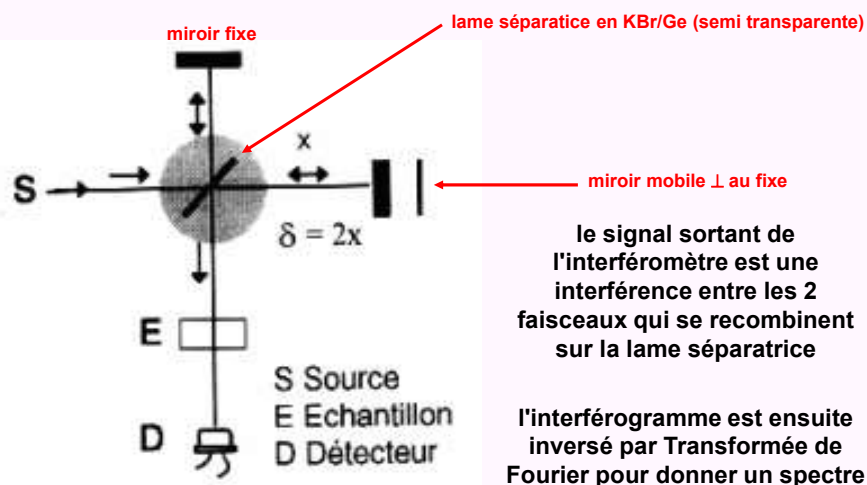
➤ Les spectromètres à transformée de fourier



- ✓ compartiment à échantillon selon la technique de travail (réflexion totale atténuée, réflexion spéculaire, réflexion diffuse, transmission, ...)
- ✓ détecteur de type photoélectrique (sulfite de plomb ou MCT - Mercure Cadmium Tellure) ou pyroélectrique (ex. DTGS - Deuterated Tri-Glycine Sulfate)
- ✓ système de traitement du signal = convertisseur qui transforme le signal analogique en signal numérique manipulable par le système informatique

✓ l'interféromètre de MICHELSON (1891)

permet de mesurer les longueurs d'onde par production d'interférences



### Avantages des appareils à Transformée de Fourier :

- rapidité des mesures
- fiabilité et reproductibilité
- haute résolution spectrale
- simplicité mécanique



#### ➤ Les matériaux optiques

Matériau	Fenêtre IR en $\text{cm}^{-1}$	Indice de réfraction à $2000 \text{ cm}^{-1}$	Propriétés générales
NaCl	4 000 - 625	1.52	Soluble dans l'eau et la glycérine, légèrement soluble dans l'alcool. Assez bonne résistance aux chocs mécaniques et thermiques, bonne transmission, facilement polissable. Economique.
KBr	4 000 - 400	1.54	Légèrement soluble dans l'eau, l'alcool et la glycérine. Hygroscopique. Assez bonne résistance aux chocs mécaniques et thermiques.

$\text{CaF}_2$	4 000 – 910	1.40	Insoluble dans l'eau, résiste à la plupart des acides et des alcalins. Grande résistance mécanique (utile pour les fortes pressions). Ne se voile pas.
KRS-5 Mélange de BrI et ITI	4 000 – 265	2.38	Légèrement soluble dans l'eau, soluble dans les bases, insoluble dans les acides. Non hygroscopique. Bonne transmission, idéal pour ATR. Maléable.
ZnSe	4 000 – 500	2.4	Insoluble dans l'eau. Bonne résistance à l'attaque chimique : les solvants organiques, les acides et bases diluées n'ont aucun effet. Faible absorption IR, parfait pour ATR.
quartz	4 000 - 3030	(~1.45)	Inattaqué par la plupart des solvants.
ZnS	4 000 - 770	2.22	Insoluble dans l'eau, les bases et les acides normaux, et virtuellement tous les solvants organiques. Réagit aux agents oxydants puissants. Bonne résistance aux chocs mécaniques et thermiques (convient de $-200$ à $+800^\circ\text{C}$ ).

BaF <sub>2</sub>	4 000 – 770	1.45	Insoluble dans l'eau, soluble dans les acides et NH <sub>4</sub> Cl. Très sensible aux chocs mécaniques et thermiques. Bonne résistance au fluor et fluorures. Ne se voile pas.
Ge	4 000 – 555	4.01	Insoluble dans l'eau, soluble dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> chaud et l'eau régale. Très fragile (convient aux faibles pressions). Adapté à l'ATR.
KCl	4 000 - 500	1.47	Semblable à NaCl mais meilleure transmission, moins soluble et pertes de réflexion moindres.

⇒ ZnSe, CaF<sub>2</sub> et BaF<sub>2</sub> résistent à l'hygrométrie

⇒ étude de matériaux biologique et de tous les échantillons en solution

#### D- Echantillonnage

##### ➤ Composés en phase solide

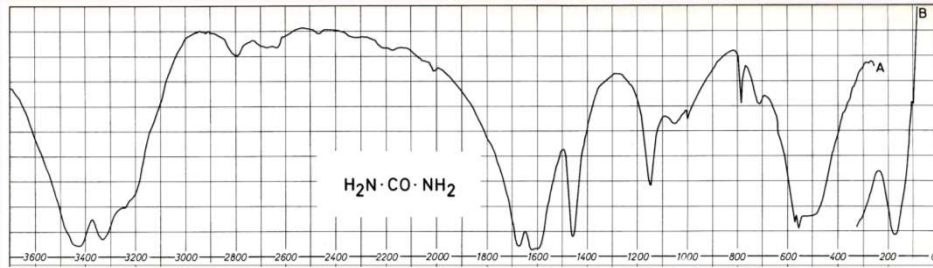
→ étude sous forme de pâtes : dispersion dans des huiles (nujol, fluorolube, ...) ou hexachlorobutadiène, ...

→ étude sous forme de pastilles : dispersion une matrice de NaCl, KBr, CsI, ...

→ étude en solution dans un solvant approprié



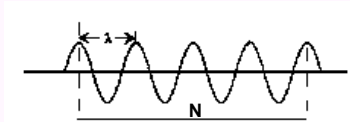
**Spectre IR de l'urée en phase solide (1 mg/400 mg KBr) :**



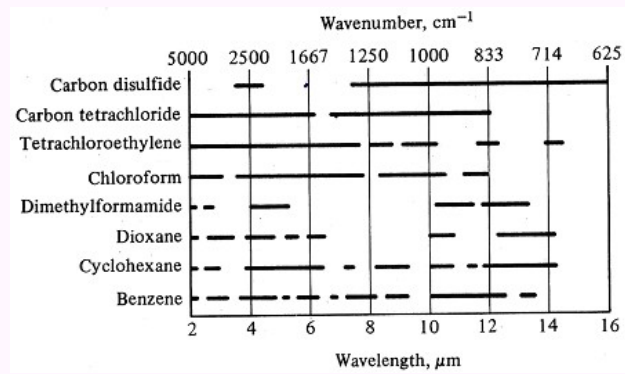
➤ **Composés en phase liquide**

→ étude sous forme de films liquides purs

→ étude en solution dans un solvant approprié



épaisseur de la cuve :  $l = \frac{N}{2n|\bar{\nu}_2 - \bar{\nu}_1|}$  (air:  $n=1$ )



**Zones de transparence des solvants usuels en moyen infrarouge.**

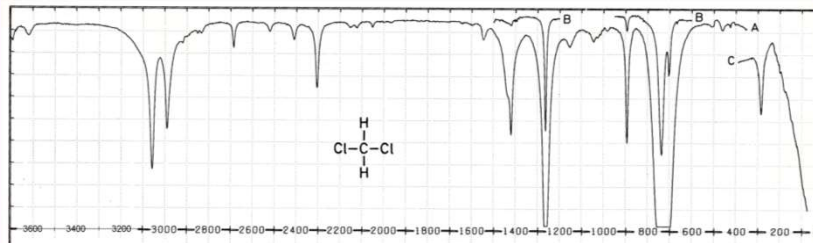
(Les lignes horizontales indiquent les régions où le solvant transmet au moins 25% de la radiation incidente dans une cellule de 1 mm)



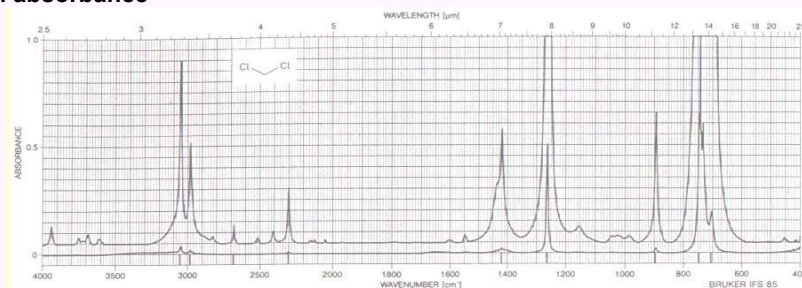
### Spectre IR du dichlorométhane en phase liquide pur

$$A = -\log(T)$$

- en transmittance



- en absorbance



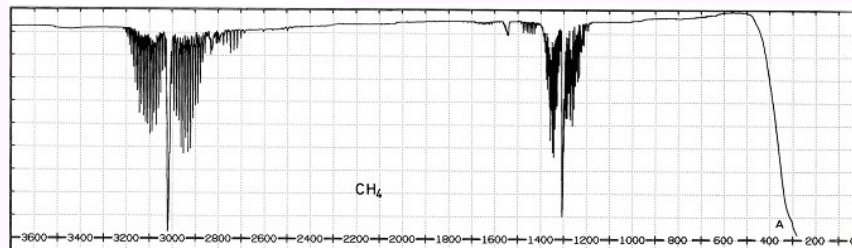
### ➤ Composés en phase gazeuse

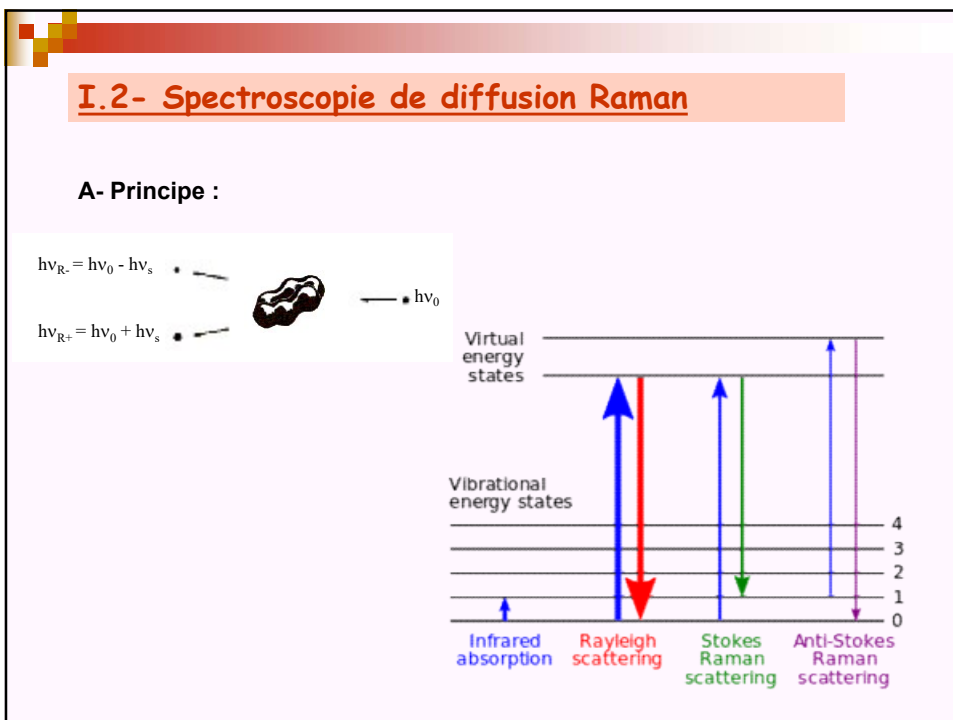
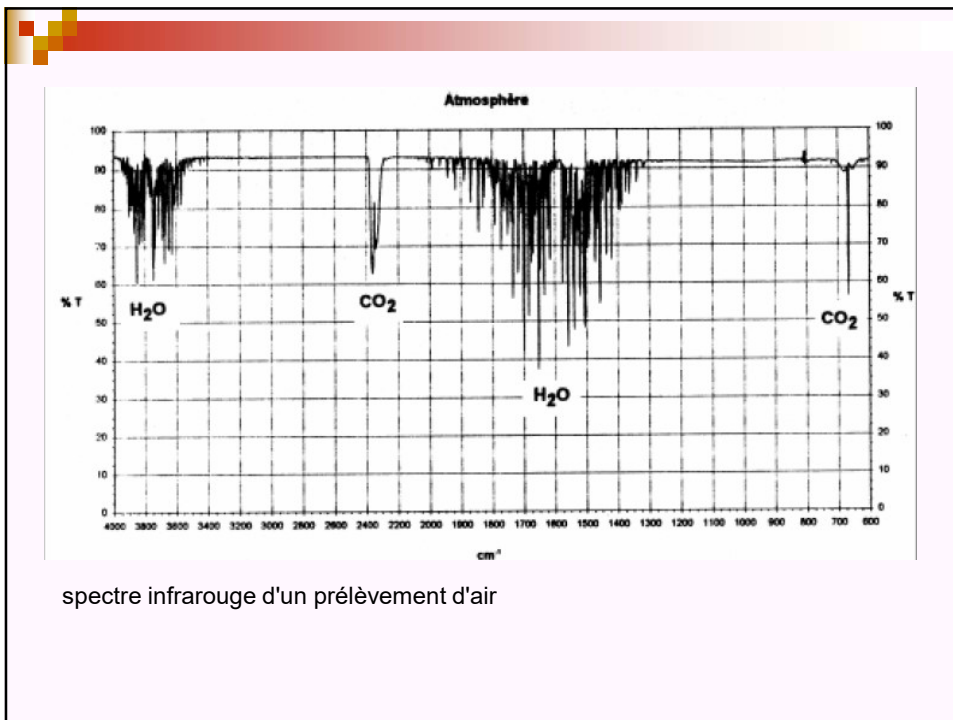
→ étude dans une cellule où le vide a été fait (pression de l'ordre de qq Pa)

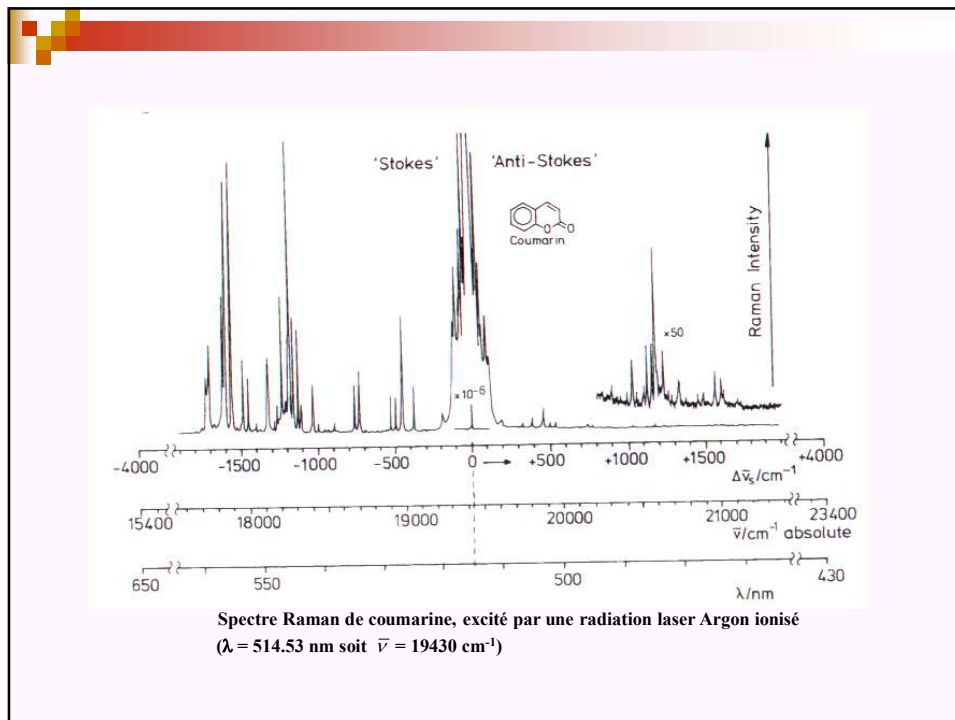
→ étude dans une cellule contenant un gaz inerte (He, Ar, N<sub>2</sub>, etc)



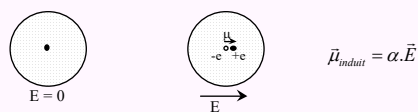
Spectre du méthane en phase gazeuse  
(cellule 10 cm, faces KBr)







## B- Propriété électrique moléculaire concernée : la polarisabilité



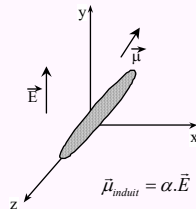
Action d'un champ électrique sur un atome

Polarisabilité ( $\text{\AA}^3$ ) de quelques atomes et ions :

	He	0.2	Li <sup>+</sup>	0.08	Be <sup>2+</sup>	0.04	B <sup>3+</sup>	0.02					
O <sup>2-</sup>	2.8	F <sup>-</sup>	1.0	Ne	0.4	Na <sup>+</sup>	0.2	Mg <sup>2+</sup>	0.11	Al <sup>3+</sup>	0.07		
S <sup>2-</sup>	5.9	Cl <sup>-</sup>	3.4	Ar	1.7	K <sup>+</sup>	0.9	Ca <sup>2+</sup>	0.5	Zn <sup>2+</sup>	0.12	Sc <sup>3+</sup>	0.4
Se <sup>2-</sup>	6.5	Br <sup>-</sup>	4.8	Kr	2.5	Rb <sup>+</sup>	1.4	Sr <sup>2+</sup>	0.9	Cd <sup>2+</sup>	1.0	Y <sup>3+</sup>	1.0
Te <sup>2-</sup>	9.7	I <sup>-</sup>	7.3	Xe	4.1	Cs <sup>+</sup>	2.5	Ba <sup>2+</sup>	1.7	Hg <sup>2+</sup>	2.0	La <sup>3+</sup>	1.6

**RQ. les atomes sont isotropes**

### RQ. les molécules sont en général anisotropes



Représentation du moment induit et du champ dans le référentiel de la molécule

$$[\alpha] = \begin{pmatrix} \alpha_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{tenseur des polarisabilités après diagonalisation}$$

la polarisabilité moyenne

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{3}(\alpha_{xx} + \alpha_{yy} + \alpha_{zz})$$

l'anisotropie des polarisabilités

$$\gamma^2 = \frac{1}{2}[(\alpha_{xx} - \alpha_{yy})^2 + (\alpha_{xx} - \alpha_{zz})^2 + (\alpha_{yy} - \alpha_{zz})^2]$$

le rapport de dépolarisation

$$\rho = \frac{\alpha_{xx}^2}{\alpha_{zz}^2}$$

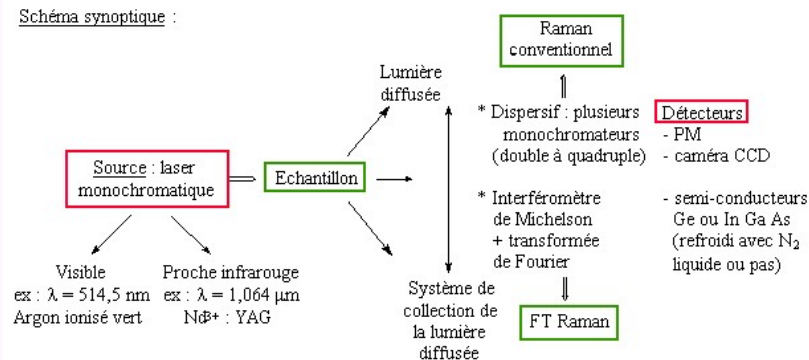
Polarisabilité moyenne ( $\text{\AA}^3$ ) de quelques molécules :

H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	OCS	CS <sub>2</sub>
1.45	3.8	4.2	2.6	5.7	8.8

⇒ se détermine expérimentalement à partir de la mesure de l'indice de réfraction et de la densité du composé

### C- Appareillage

Schéma synoptique :



Explication des sigles :

PM = photomultiplicateur  
 caméra CCD = Charged Coupled Device  
 Ge : germanium  
 In Ga As : Arsénure d'Indium dopé au Gallium  
 Nd<sup>3+</sup> : YAG : cristal d'un garnet d'yttrium aluminium dopé avec 3% d'ions Nd<sup>3+</sup>

**Avantages :**

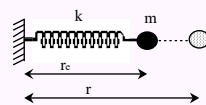
- utilisable quel que soit l'état physique du matériau
- facile à mettre en œuvre
- large domaine d'utilisation (des micro-ondes au proche IR)
- méthode non destructive et nécessite peu de matière
- bien adapté aux études en milieu aqueux
- se prête bien aux études in situ et/ou sous contrainte
- utilisable pour l'étude de milieux orientés

**Inconvénients :**

- sensibilité moins bonne qu'en IR
- analyse quantitative avec précaution (étalon interne)
- bibliothèque de spectres encore très incomplète
- attention aux poussières et à la fluorescence

**II- Les molécules diatomiques****A- L'oscillateur harmonique**

Soit un atome de masse  $m$  lié à un point fixe par une force de rappel



L'énergie potentielle vaut

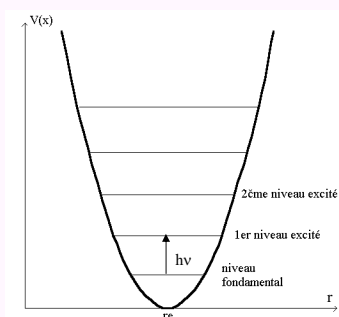
si  $x$  est petit  
avec  $x = r - r_e$

$$V(x) = \frac{1}{2} kx^2$$

⇒ quantification :  $E_v = (v + 1/2) h\nu$

⇒ nombre d'onde associé à la transition :

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



La seule transition permise ici est le passage de la molécule de son niveau fondamental (noté  $v = 0$ ) à son premier niveau excité (noté  $v = 1$ ).

Cette transition peut être observée :

soit en sp. infrarouge (molécules diatomiques hétéro-nucléaires et vibrations antisymétriques),

soit en sp. Raman (molécules diatomiques homonucléaires et vibrations symétriques)

**Application :**

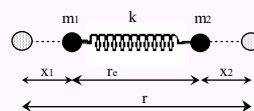
on peut calculer approximativement  $k$  dans HCl à partir de  $\bar{\nu} = 2990 \text{ cm}^{-1}$  et en supposant que seul l'atome d'hydrogène se déplace par rapport à Cl immobile :

$$k = M_H \lambda_M = M_H \left( \frac{\bar{\nu} (\text{cm}^{-1})}{1303} \right)^2 = 1 \frac{2990^2}{1303^2} = 5.3 \text{ N.cm}^{-1}$$

### Cas d'un vibreur diatomique

Soit un vibreur diatomique (liaison, molécule) constitué de deux masses ponctuelles  $m_1$  et  $m_2$

$$x_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} x \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} x$$



le nombre d'onde de la vibration est donné par :  $\bar{\nu} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$

$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$  est appelée masse réduite du système

Constantes de force (N/m) de quelques molécules diatomiques :

HF	970				
HCl	520	HBr	410	HI	320
F <sub>2</sub>	450	Cl <sub>2</sub>	320		
O <sub>2</sub>	1140				
NO	1550	CO	1860	N <sub>2</sub>	2240

### Constantes de force (N/m) de quelques liaisons :

O-H	780	S-H	430	N-H	650	C-H	470-590
C-C	450-560	C-N	490-560	C-O	500-580		
C=C	950-990	C=N	1000-1100	C=O	1180-1340		
C≡C	1560-1700	C≡N	1620-1820				

### Zones de fréquences caractéristiques (X, Y, Z = C, O, N et n = 1, 2, 3) :

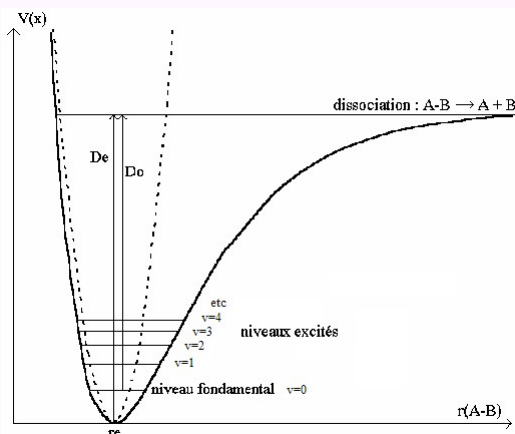
$XH_n$	2600-3600 $\text{cm}^{-1}$
$X\equiv Y$ et $X=Y=Z$	2050-2250 $\text{cm}^{-1}$
$X=Y$	1600-1800 $\text{cm}^{-1}$

### Amplitudes maximales des vibrations :

Molécule	$r_e$ (Å)	$\bar{\nu}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$(r - r_e)_{\text{max}}$ (Å)	différence (%)
N <sub>2</sub>	1.094	2360	0.045	4.1
CO	1.128	2170	0.048	4.2
NO	1.151	1904	0.049	4.2
O <sub>2</sub>	1.207	1580	0.052	4.3
HI	1.414	2310	0.12	7.5
HBr	1.604	2650	0.11	8.0
HCl	1.275	2990	0.11	8.4
LiH	1.595	1406	0.17	10.4
HF	0.917	2998	0.11	11.8

$$(r - r_e)_{\text{max}} = \sqrt{\frac{h}{4\pi^2 c \bar{\nu} \mu}}$$

### B- L'oscillateur anharmonique



Courbe d'énergie potentielle d'un oscillateur anharmonique  
(la courbe en pointillés correspond à l'oscillateur harmonique)

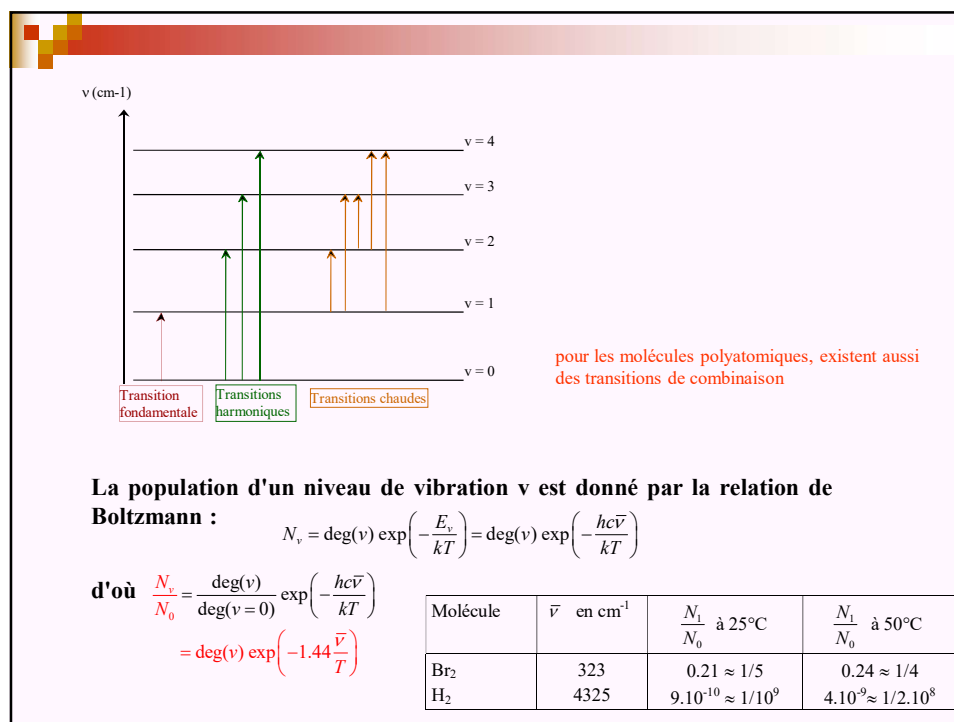
$$V(x) = D_e [1 - \exp(-\beta x)]^2$$

$$E_v = (v + 1/2) h\nu_e - x_e (v + 1/2)^2 h\nu_e$$

$$\nu_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\beta^2 D_e}{\mu}} \quad x_e = \frac{h\nu_e}{4D_e}$$

$$k = 2\beta^2 D_e$$

$D_0 = D_e - 1/2 h\nu_e$   
 énergie de dissociation chimique  
 énergie de dissociation spectroscopique



il s'en suit :

- les transitions **fondamentales** sont les transitions les plus intenses car le niveau  $v = 0$  est le plus peuplé et  $\Delta v = 1$ . Leur intensité diminue lorsque la température augmente (le niveau  $v = 0$  se dépeuple).
- les transitions **harmoniques** sont des transitions moins intenses car le niveau  $v = 0$  est le plus peuplé mais  $\Delta v \neq 1$ . Leur intensité diminue lorsque la température augmente.
- les transitions **chaudes** sont des transitions moins intenses car les niveaux  $v \neq 0$  sont de moins en moins peuplés. Leur intensité augmente avec la température (les niveaux excités de départ se peuplent).

**Remarque :** les intensités des transitions harmoniques et chaudes peuvent s'entrecroiser, de même que celles des transitions de combinaison.



### III- Les molécules polyatomiques

Soit une molécule quelconque à  $n$  atomes

1 atome possède 3 coordonnées  $x, y, z$

donc la molécule aura  $3n$  degrés de liberté

D'autre part, la molécule possède

3 degrés de liberté de translation

et 3 autres de rotation

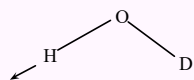
Il restera  $(3n-6)$  degrés de liberté de vibration

et donc  $(3n-6)$  modes normaux de vibration

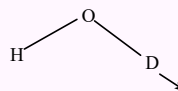
= vibrations fondamentales

Exemple : HDO, 3 modes normaux de vibration

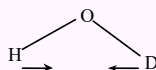
2 élongations de valence + 1 déformation angulaire



Mode normal d'élongation de valence de la liaison O-H :  
 $\bar{\nu}_{OH} = 3707.5 \text{ cm}^{-1}$



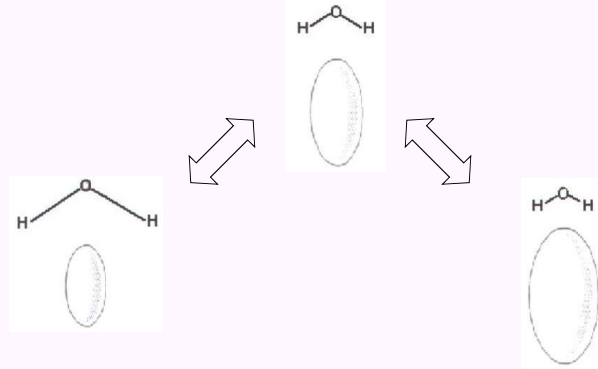
Mode normal d'élongation de valence de la liaison O-D :  
 $\bar{\nu}_{OD} = 2724 \text{ cm}^{-1}$



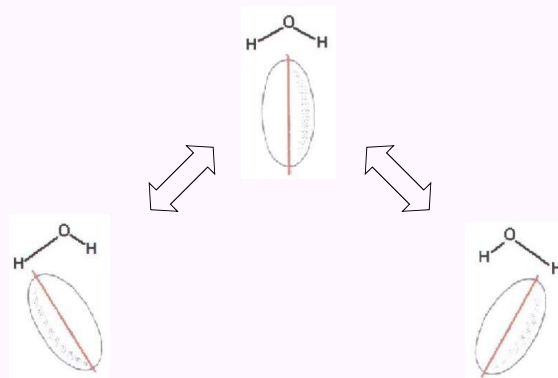
Mode normal de déformation angulaire de l'angle (HOD) :  
 $\delta_{HOD} = 1402 \text{ cm}^{-1}$

*Exemple : H<sub>2</sub>O, 3 modes normaux de vibration*

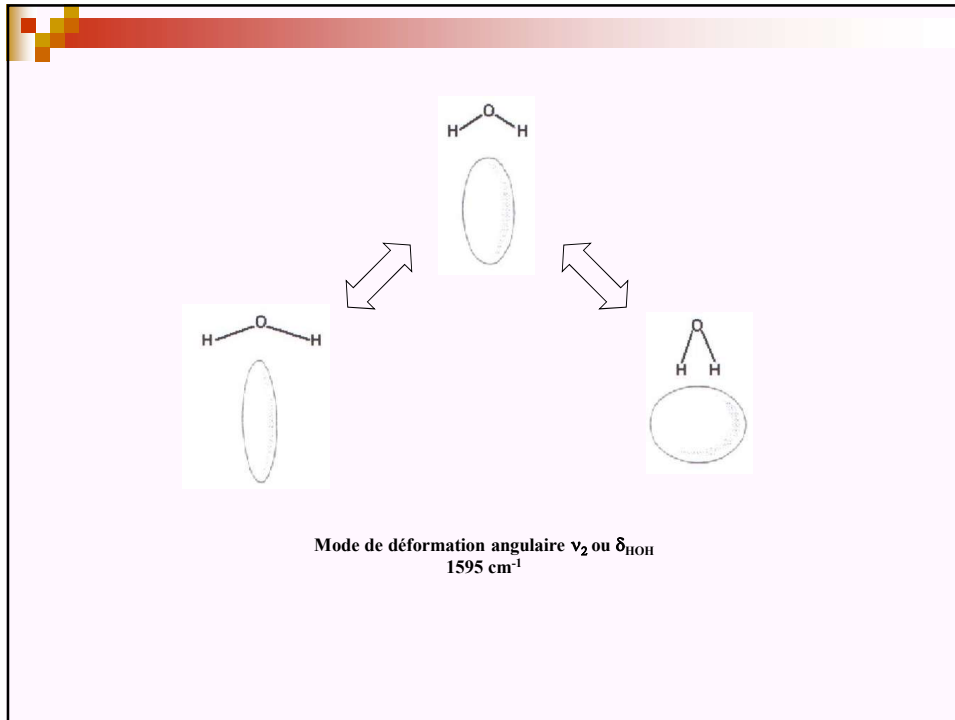
2 élongations de valence + 1 déformation angulaire



Mode d'élongation de valence symétrique  $\nu_1$  ou  $\nu_{s(OH)}$   
3656 cm<sup>-1</sup>



Mode d'élongation de valence antisymétrique  $\nu_3$  ou  $\nu_{a(OH)}$   
3757 cm<sup>-1</sup>



Modes actifs en infrarouge :

Tous car  $\left(\frac{d\mu}{dq}\right) \neq 0$  pour les 3 modes de vibration

Modes actifs en Raman :

Tous car  $\left(\frac{d\alpha}{dq}\right) \neq 0$  pour les 3 modes de vibration

idem pour HDO



### Cas particulier des molécules linéaires

Soit une molécule linéaire à  $n$  atomes

1 atome possède 3 coordonnées  $x, y, z$

donc la molécule aura  $3n$  degrés de liberté

D'autre part, la molécule possède

3 degrés de liberté de translation

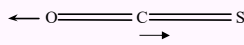
mais seulement 2 de rotation

Il restera  $(3n-5)$  degrés de liberté de vibration

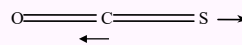
et donc  $(3n-5)$  modes normaux de vibration

*Exemple* : OCS, 4 modes normaux de vibration

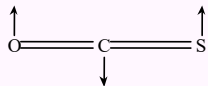
2 élongations de valence + 2 déformations angulaires



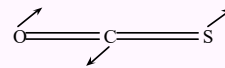
Mode normal d'élongation de valence de la liaison C=O :  $\bar{\nu}_{CO} = 2062 \text{ cm}^{-1}$



Mode normal d'élongation de valence de la liaison C=S :  $\bar{\nu}_{CS} = 859 \text{ cm}^{-1}$



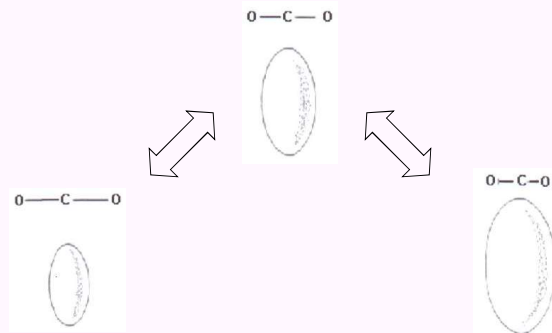
Modes normaux de déformation angulaire :  $\delta_{OCS} = 520 \text{ cm}^{-1}$



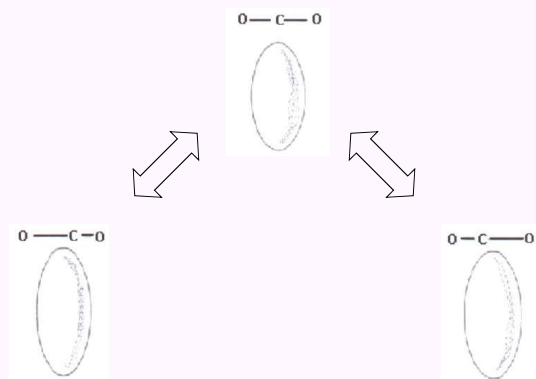
**Particularité** : ce mode est dit « dégénéré d'ordre 2 »

*Exemple : CO<sub>2</sub>, 4 modes normaux de vibration*

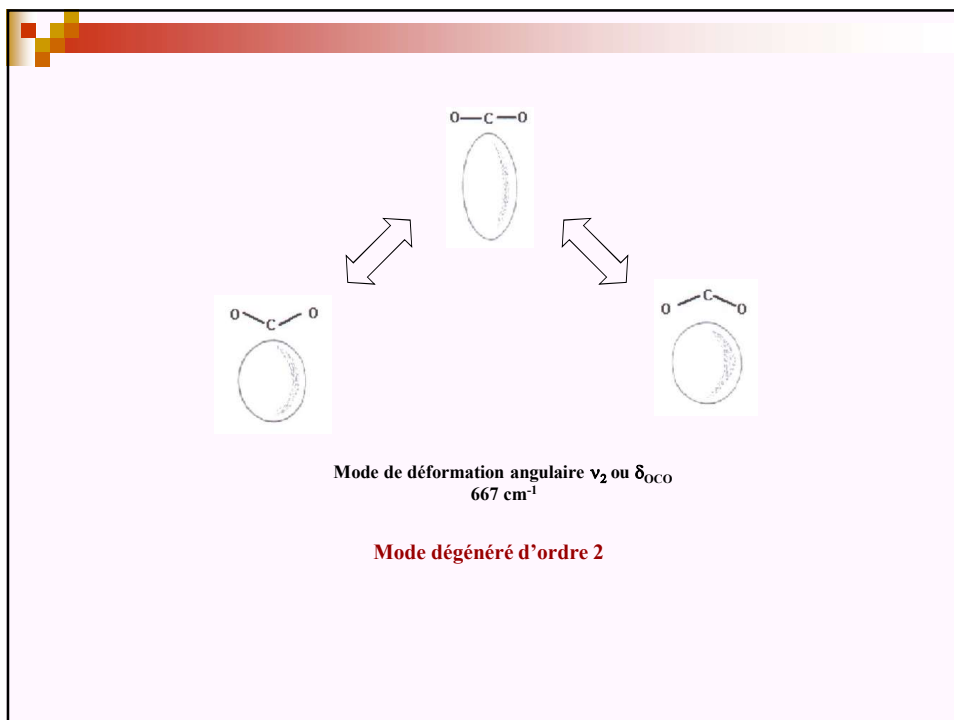
2 élongations de valence + 2 déformations angulaires



Mode d'élongation de valence symétrique  $\nu_1$  ou  $\nu_{s(\text{CO})}$   
1388  $\text{cm}^{-1}$



Mode d'élongation de valence antisymétrique  $\nu_3$  ou  $\nu_{a(\text{CO})}$   
2349  $\text{cm}^{-1}$



**Modes actifs en infra-rouge :**

$\nu_a$  et  $\delta$  car  $\left(\frac{d\mu}{dq}\right) \neq 0$  , mais pour  $\nu_s$   $\left(\frac{d\mu}{dq}\right) = 0$

**Modes actifs en Raman :**

$\nu_s$  car  $\left(\frac{d\alpha}{dq}\right) \neq 0$  , mais pour  $\nu_a$  et  $\delta$   $\left(\frac{d\alpha}{dq}\right) = 0$

**=> Principe d'exclusion mutuelle**

$\nu_1$

$\nu_2$

$\nu_3$

### Symétrie et dégénérescence :

Les modes de vibration sont symétriques ou antisymétriques par rapport aux éléments de symétrie de la molécule.

Dans le cas où il n'existe pas d'axe multiple  $C_n$ ,  $S_n$ , avec  $n > 2$ , il n'y a pas de dégénérescence, autrement dit chaque fréquence est associée à un seul mode de vibration. (ex.  $H_2O$ , axe  $C_2$ , HDO).

Dans le cas où il existe un seul axe multiple, il existe au moins une fréquence dégénérée d'ordre 2, c'est à dire associée à deux modes de vibration. (ex.  $CO_2$ , axe  $C_\infty$ ,  $NH_3$ , axe  $C_3$ ).

Dans le cas des molécules possédant plus d'un axe multiple, les dégénérescences vont jusqu'à l'ordre 3. (ex.  $CH_4$ ,  $SF_6$ ).

### Les fréquences de groupe dans les molécules complexes :

Zones de fréquences caractéristiques (X, Y, Z = C, O, N et n = 1, 2, 3) :

$XH_n$	2600-3600 $cm^{-1}$	
$X=Y$ et $X=Y=Z$	2050-2250 $cm^{-1}$	
$X=Y$	1600-1800 $cm^{-1}$	
« empreinte digitale »	800-1200 $cm^{-1}$	Zone chargée, souvent non exploitable sans logiciel spécialisé

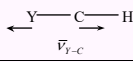
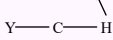
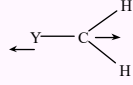
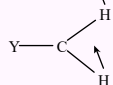
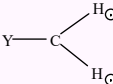
Cas des groupements  $XH_n$  (X = C, O, N et n = 1, 2, 3)

Modes de vibration des groupes  $XH_n$  avec leur dégénérescence

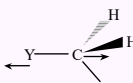
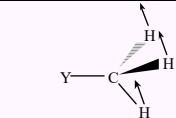
n	élongations de valence	déformations angulaires
1	$\bar{\nu}$	-
2	$\bar{\nu}_s, \bar{\nu}_a$	$\delta$
3	$\bar{\nu}_s, \bar{\nu}_a$ (dégénéré d'ordre 2)	$\delta_s, \delta_a$ (dégénéré d'ordre 2)

!!! Leurs harmoniques sont utilisés dans le PIR (4000-13000  $cm^{-1}$ )

Si la molécule rattachée au groupement  $\text{XH}_n$  est assimilée à une masse ponctuelle Y, il apparaît trois nouveaux modes de vibration de fréquence relativement basse

n	élongations de valence	déformations angulaires
1	 $\bar{\nu}_{Y-C}$	 $\delta_{\text{XCH}_2}$ , déformation (dégénéré d'ordre 2)
2	 $\bar{\nu}_{Y-C}$	 $\delta_{r(\text{CH}_2)}$ , balancement dans le plan  $\delta_{w(\text{CH}_2)}$ , balancement hors du plan

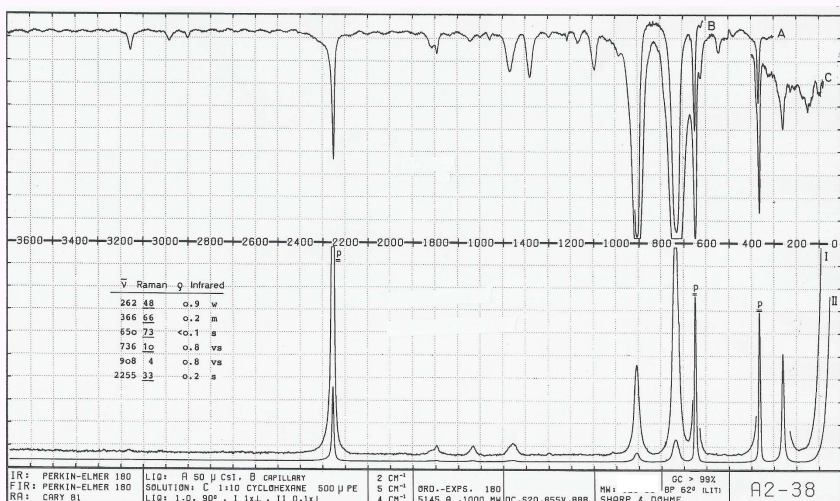
Si la molécule rattachée au groupement  $\text{XH}_n$  est assimilée à une masse ponctuelle Y, il apparaît trois nouveaux modes de vibration de fréquence relativement basse

n	élongations de valence	déformations angulaires
3	 $\bar{\nu}_{Y-C}$	 $\delta_{r(\text{CH}_3)}$ , balancement (dégénéré d'ordre 2)

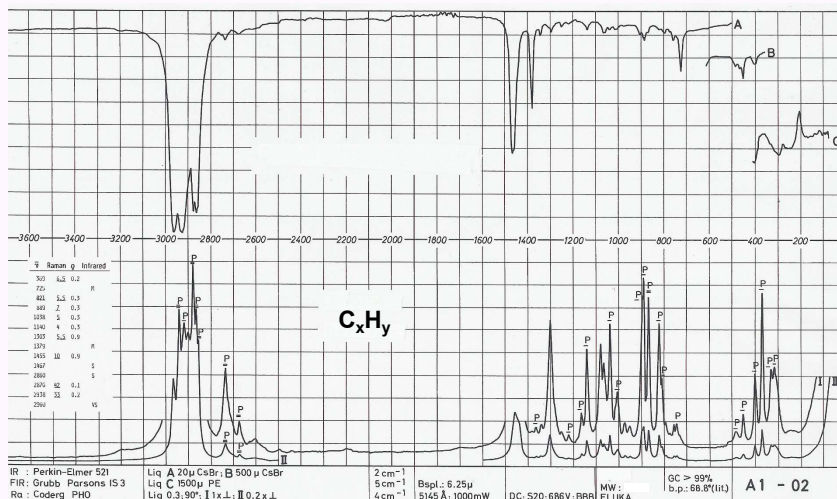
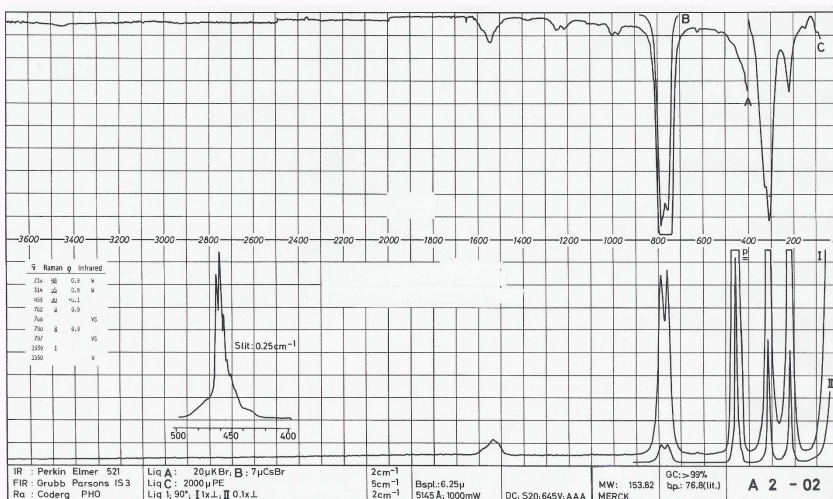


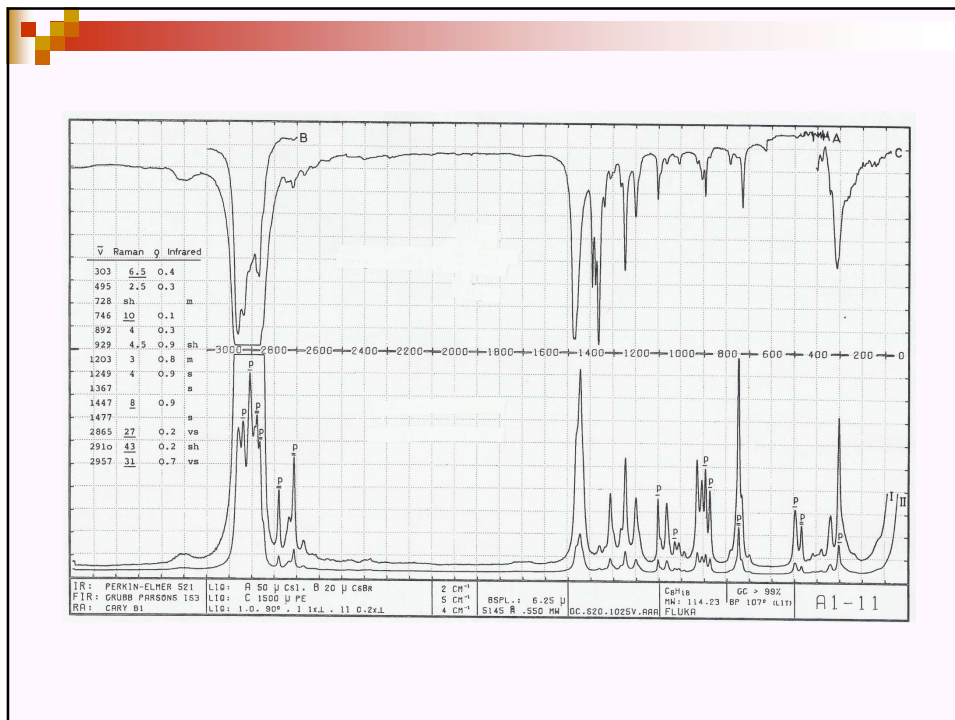
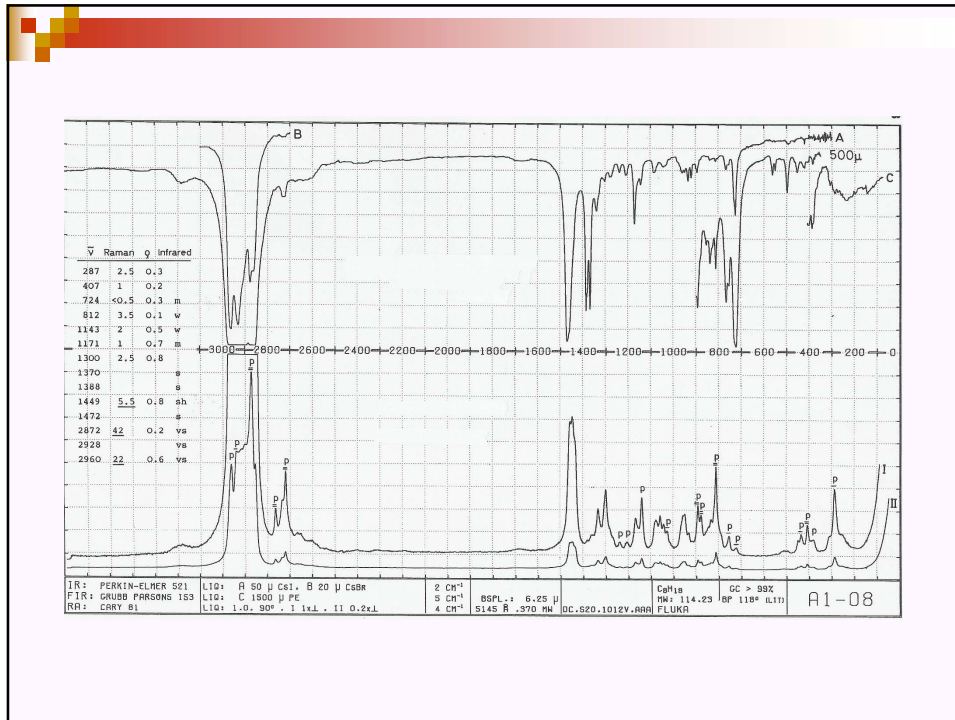


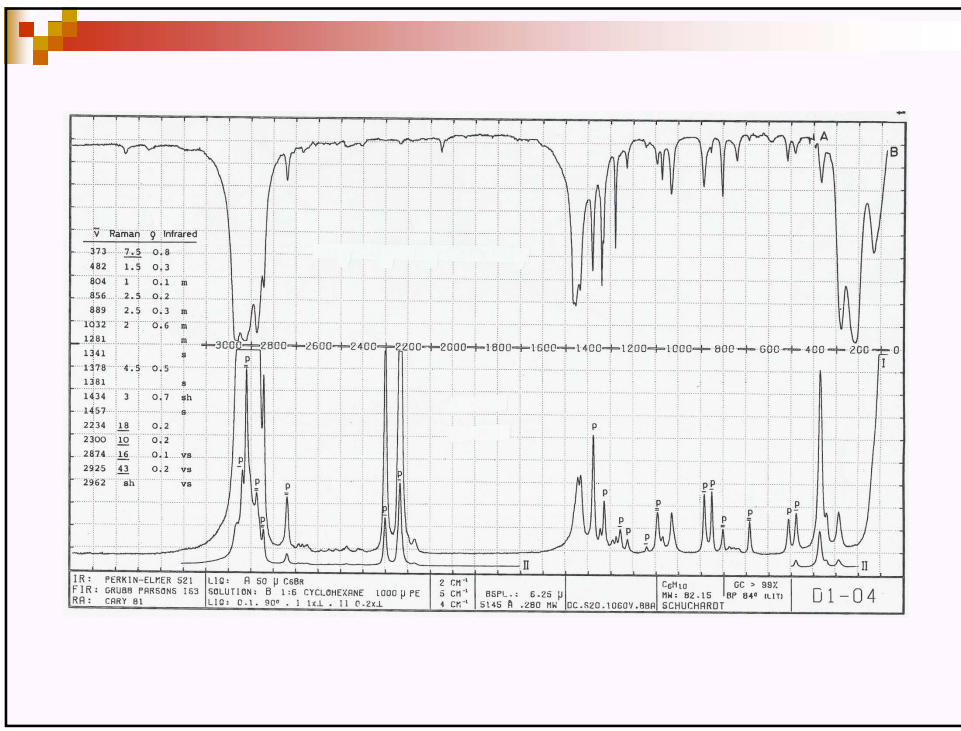
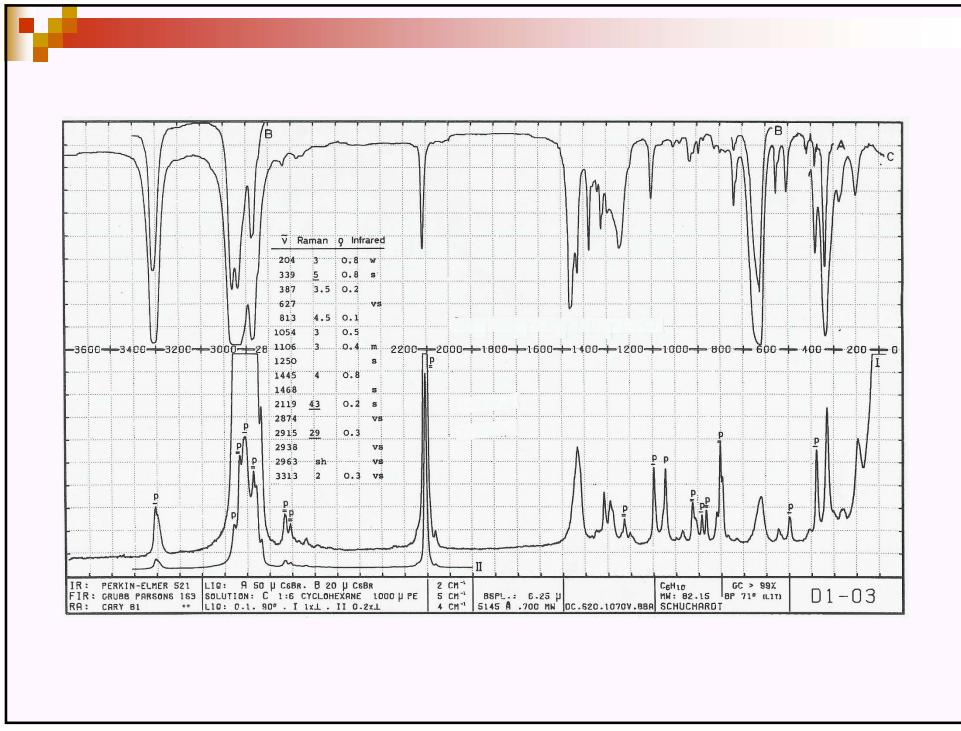
### IV- Analyse de spectres

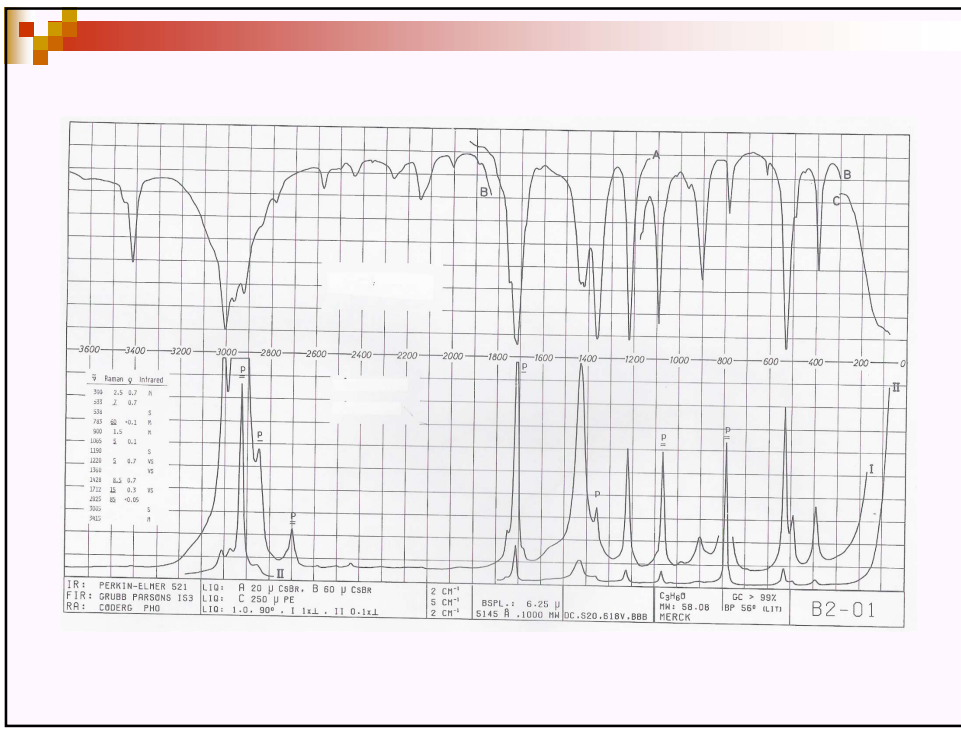
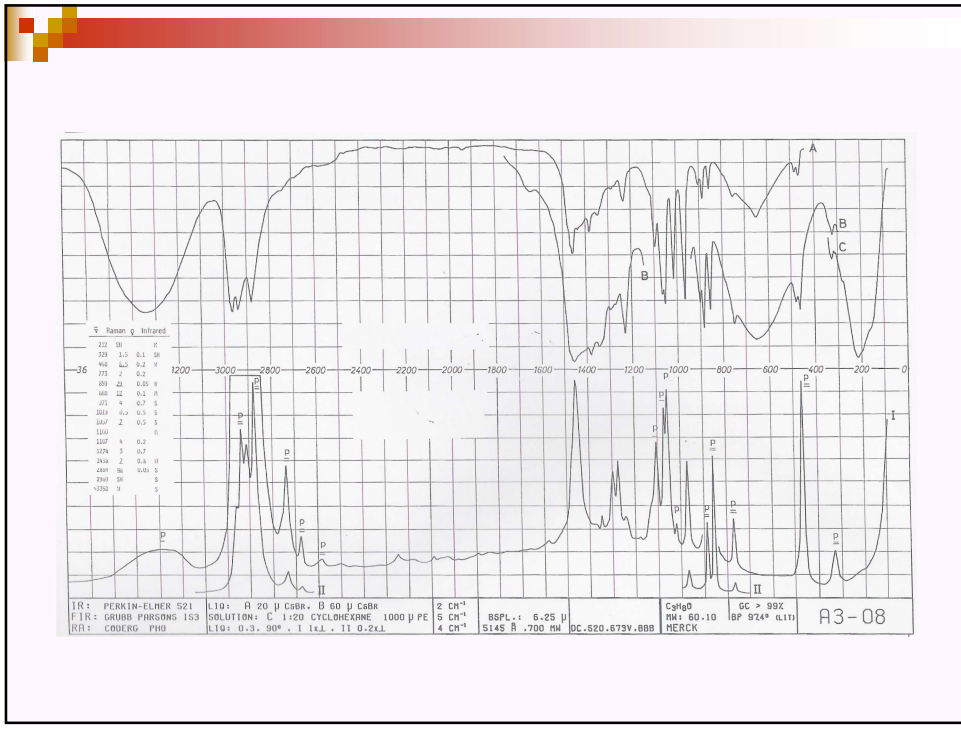


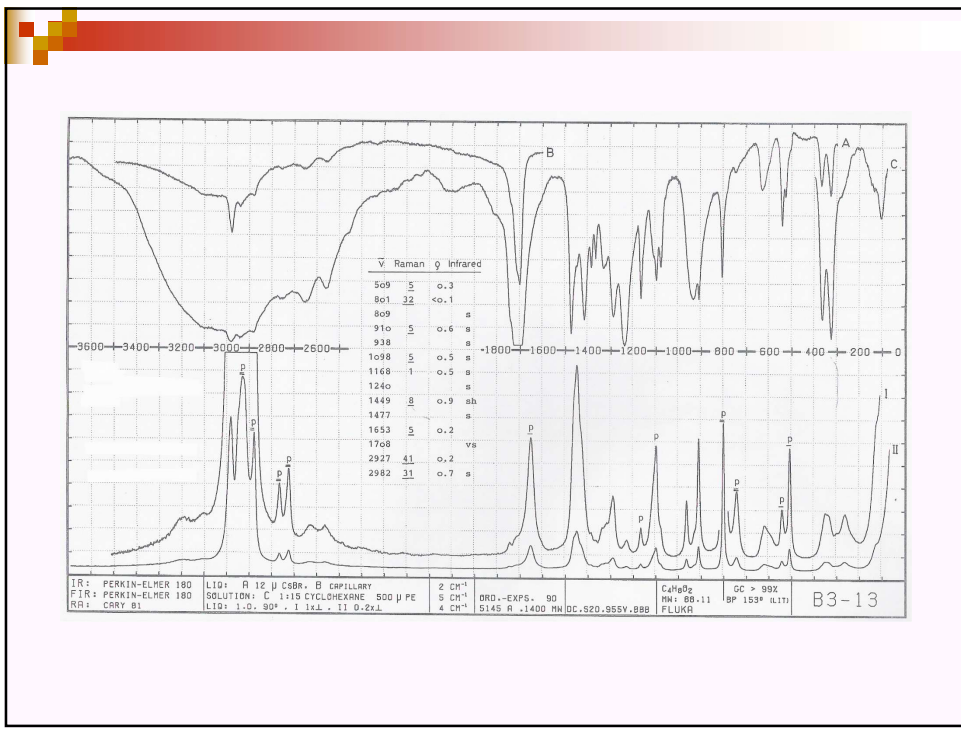
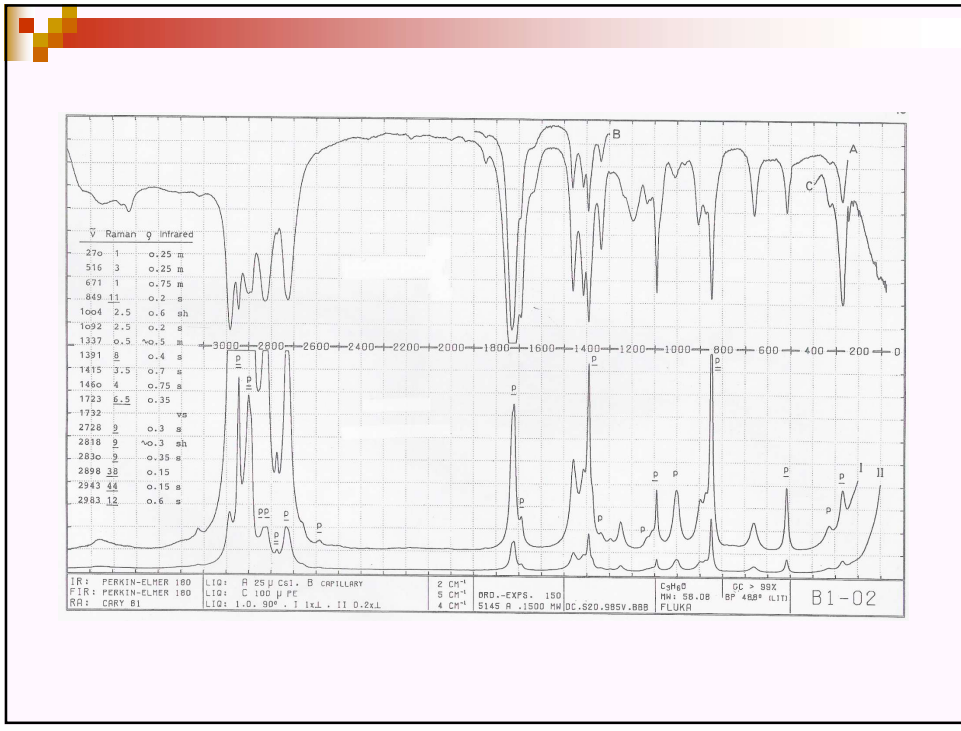
**CY<sub>n</sub>X<sub>n'</sub> (X = halogène, n+n'=4)**

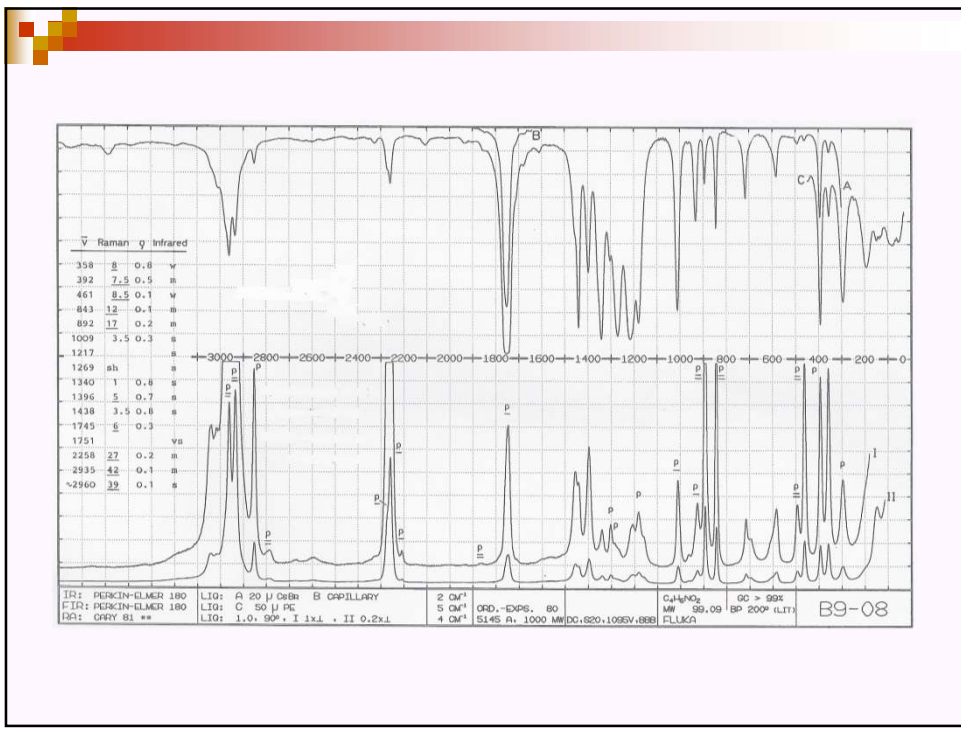
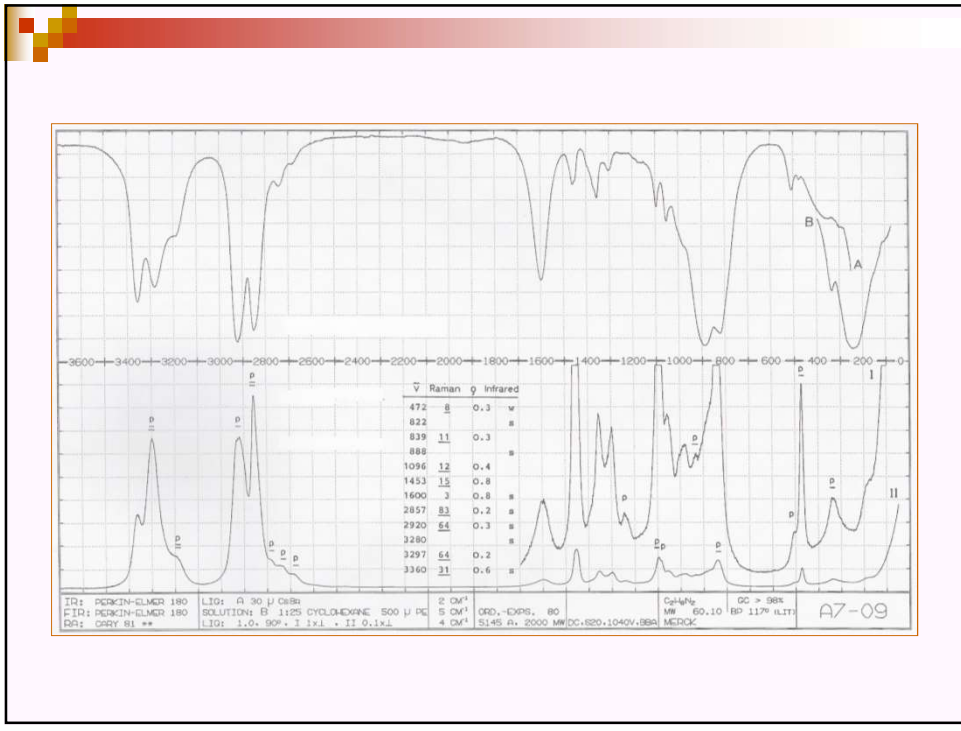


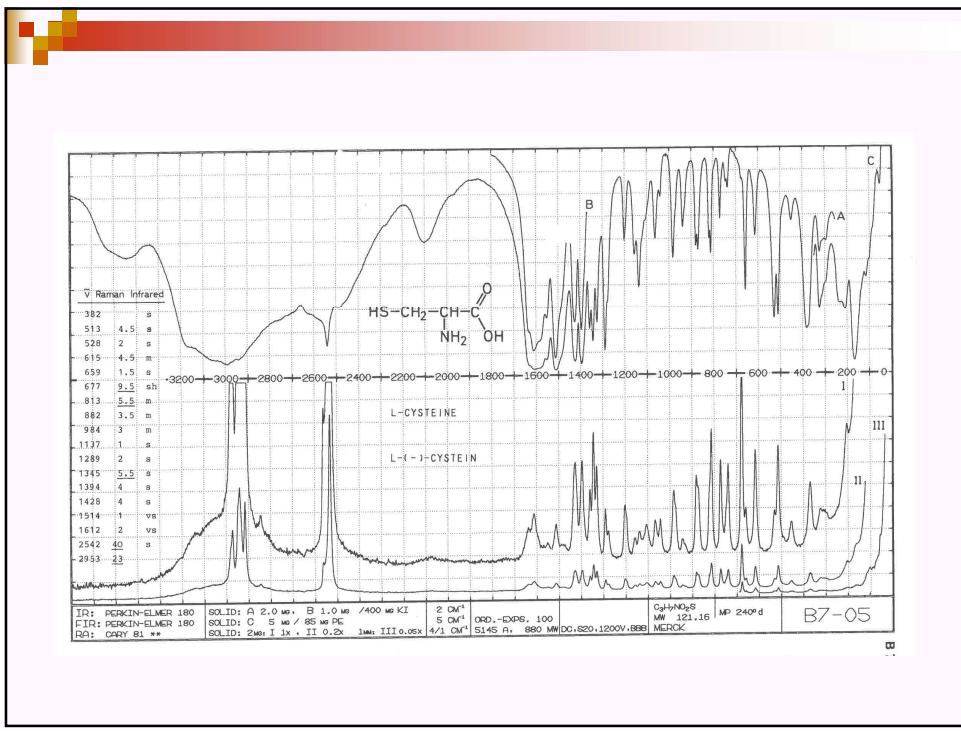














## **V- Exemples d'applications analytiques**

### **Spectroscopie infrarouge :**

- étude de composés organiques et inorganiques à l'état gazeux, liquide ou solide
- analyse fonctionnelle
- analyse structurale
- analyse qualitative
- analyse quantitative

→ industrie pharmaceutique, chimique, polymères, agro-alimentaire, textile, géologie, etc

### **Spectroscopie de Diffusion Raman :**

- étude d'échantillons de toutes origines (minérale, biologique, organique, géologique, synthétique)
- analyse de surfaces homogènes (détermination d'un revêtement, caractérisation de fibres de graphite et de carbone, catalyseurs, films minces)
- industrie des polymères (contaminations incluses, fluorescence, analyse des textiles non tissés, étude de fibres enrobées)
- industrie du verre (cristallisation dans une bulle, produits de démixtion)
- industrie électronique (pollution sur un microcircuit, pollution sur un contact, défaut à la surface d'un semiconducteur, différenciation Si-SiO<sub>2</sub>-SiO)
- géologie (inclusion solide dans une matrice transparente, inclusion biphasée, différenciation en série carbonatée, analyse de microfossiles)
- biologie (analyse de calculs urinaires, microcristaux dans les myxomycètes, concrétions intracellulaires)