

Atomistique et liaisons chimiques I

Table des matières

I	Introduction à la chimie quantique	2
1	Les insuffisances de la mécanique classique	2
2	Les bases de la mécanique quantique	2
3	Domaine de la chimie quantique	2
4	Applications dans les recherches récentes	2
5	Objectifs de ce cours	2
II	Les postulats de la mécanique quantique	4
6	Postulat 1	4
7	Postulat 2	4
7.1	généralités sur les opérateurs	4
7.2	Propriétés des opérateurs	5
7.3	Principe de correspondance	5
8	Postulat 3	6
9	Postulat 4	6

Première partie

Introduction à la chimie quantique

1 Les insuffisances de la mécanique classique

- l'effet photoélectrique :
Première mise en évidence de la dualité onde-corpuscule.
- le rayonnement du corps noir :
Catastrophe UV.
- Le spectre d'émission des atomes :
La discrétion du spectre obtenu ne peut être expliquée par la mécanique classique.
(en mécanique quantique, on a la relation de De Broglie $\Delta E = E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$)

2 Les bases de la mécanique quantique

- La dualité onde-corpuscule (De Broglie) :
À toute particule qui a une masse on peut attribuer une onde : $\lambda = \frac{h}{mv}$
- L'inégalité de Heisenberg :
 $\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$
où Δq est l'incertitude sur la position,
et Δp , l'incertitude sur la quantité de mouvement.

3 Domaine de la chimie quantique

On se sert des outils de la chimie quantique sur les systèmes plus petits que les protéines. Pour des systèmes dont la taille est plus importante, les propriétés quantiques sont négligeables.

4 Applications dans les recherches récentes

- dépliement et repliement des enzymes
- changements de conformation des molécules en solution
- changement de phase
- phénomènes d'excitation et de désexcitation dans les complexes
- simulation de spectres RMN

5 Objectifs de ce cours

- être capable de comprendre et décrire la structure électronique des atomes et des molécules.

- comprendre, expliquer et prédire les propriétés structurales et spectrométriques ainsi que la réactivité des systèmes chimiques.

Deuxième partie

Les postulats de la mécanique quantique

La mécanique quantique se base sur six postulats qui ont toujours été vérifiés. Nous n'en verrons et utiliserons seulement quatre dans ce cours.

6 Postulat 1

L'état d'un système à un instant t est complètement défini par la connaissance de sa fonction d'onde, notée $\Psi(\vec{r}, t)$.

- Dans $\Psi(\vec{r}, t)$, \vec{r} désigne la variable de l'espace tandis que t désigne la variable du temps.
- La fonction d'onde $\Psi(\vec{r}, t)$ n'a aucun sens physique.
- $dP(\vec{r}, t) = \Psi^*(\vec{r}, t) \cdot \Psi(\vec{r}, t) dV = |\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV$ est une probabilité infinitésimale.
($\Psi^*(\vec{r}, t)$ est la fonction conjuguée de la fonction $\Psi(\vec{r}, t)$)
- $\frac{dP(\vec{r}, t)}{dV}$ est une densité de probabilité.
- La fonction d'onde est normée : $P(t) = \int_x \int_y \int_z dP(\vec{r}, t) = 1$
- La fonction d'onde est une fonction continue, dérivable et de carré sommable. Sa dérivée première doit aussi être continue et dérivable.
- La notation de Dirac :
 - à $\Psi(\vec{r}, t)$, on associe un "ket" $|\Psi(t)\rangle$
 - à $\Psi^*(\vec{r}, t)$, on associe un "bra" $\langle \Psi(t)|$
- On définit ainsi le produit scalaire de deux fonctions d'ondes par :

$$\int_x \int_y \int_z \Psi^*(\vec{r}, t) \cdot \Theta(\vec{r}, t) dV = \langle \Psi(t) | \Theta(t) \rangle$$

7 Postulat 2

À toute grandeur A mesurable, on associe en mécanique quantique un opérateur linéaire et hermitique, noté \hat{A} .

7.1 généralités sur les opérateurs

- Les opérateurs agissent sur les fonctions : $\hat{A}\Psi(\vec{r}, t) = \Theta(\vec{r}, t)$
- Cas particulier : l'opérateur est un scalaire : $\hat{A}\Psi(\vec{r}, t) = \lambda\Psi(\vec{r}, t)$ On dit alors que :
 - λ est une valeur propre de \hat{A}

- $\Psi(\vec{r}, t)$ est un vecteur propre de \hat{A} associé à la valeur propre λ
- on parle alors d'équation aux valeurs propres.
L'équation de Schrödinger est une équation aux valeurs propres.
- Notion de dégénérescence :
Si deux fonctions différentes donnent, pour un opérateur donné, la même valeur propre, elles sont dites dégénérées.

7.2 Propriétés des opérateurs

- Somme : $\hat{S} = \hat{A} + \hat{B}$

$$\hat{S}\Psi(\vec{r}, t) = \hat{A}\Psi(\vec{r}, t) + \hat{B}\Psi(\vec{r}, t)$$

- Produit (ou composition) : $\hat{P} = \hat{A} \cdot \hat{B}$

$$\hat{P}\Psi(\vec{r}, t) = \hat{A}(\hat{B}\Psi(\vec{r}, t))$$

- Le produit n'est pas commutatif
- On introduit alors le commutateur (un autre opérateur) :

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A} \cdot \hat{B} - \hat{B} \cdot \hat{A}$$

- Les opérateurs \hat{A} et \hat{B} commutent si et seulement si $[\hat{A}, \hat{B}]$ est nul.
- Deux opérateurs qui commutent admettent le même ensemble de fonctions propres.
- Linéarité : $\hat{A}(\alpha\Psi(\vec{r}, t) + \beta\Theta(\vec{r}, t)) = \alpha\hat{A}\Psi(\vec{r}, t) + \beta\hat{A}\Theta(\vec{r}, t)$
- Démontrons que toute combinaison linéaire de fonctions propres dégénérées d'un opérateur est également fonction propre de cet opérateur avec la même valeur propre.

Démonstration. Pour \hat{A} , un opérateur,

$$\begin{aligned} \hat{A} \cdot \sum_i \alpha_i \Psi_i &= \sum_i \alpha_i \hat{A} \Psi_i \\ &= \sum_i \alpha_i \lambda \Psi_i \quad \text{les fonctions } \Psi_i \text{ ayant toutes la même valeur propre } \lambda \\ &= \lambda \sum_i \alpha_i \Psi_i \end{aligned}$$

□

- Hermiticité : ces valeurs propres sont réelles et ses vecteurs propres sont orthogonaux.

7.3 Principe de correspondance

En mécanique quantique, tout opérateur peut être construit à partir des opérateurs position et quantité de mouvement :

- opérateur position : associé à la coordonnée q_i d'une particule, il consiste à multiplier par la variable q_i , $\hat{q}_i = q_i \cdot$:

$$\begin{cases} \hat{x} = x \cdot \\ \hat{y} = y \cdot \\ \hat{z} = z \cdot \end{cases}$$

- opérateur quantité de mouvement : associé à la coordonnée p_i d'une particule, il consiste à dériver par rapport à cette coordonnée et à multiplier par $-i\hbar$: $\hat{p}_i = -i\hbar \cdot \frac{\partial}{\partial q_i}$

$$\begin{cases} \hat{p}_x = -i\hbar \cdot \frac{\partial}{\partial x} \\ \hat{p}_y = -i\hbar \cdot \frac{\partial}{\partial y} \\ \hat{p}_z = -i\hbar \cdot \frac{\partial}{\partial z} \end{cases}$$

8 Postulat 3

L'évolution d'un système est régie par l'équation de Schrödinger dépendante du temps.

9 Postulat 4

Les valeurs de A mesurées expérimentalement ne peuvent être que des valeurs propres de son opérateur \hat{A} .