

# CHAPITRE IV

## *Adsorption des Gaz*

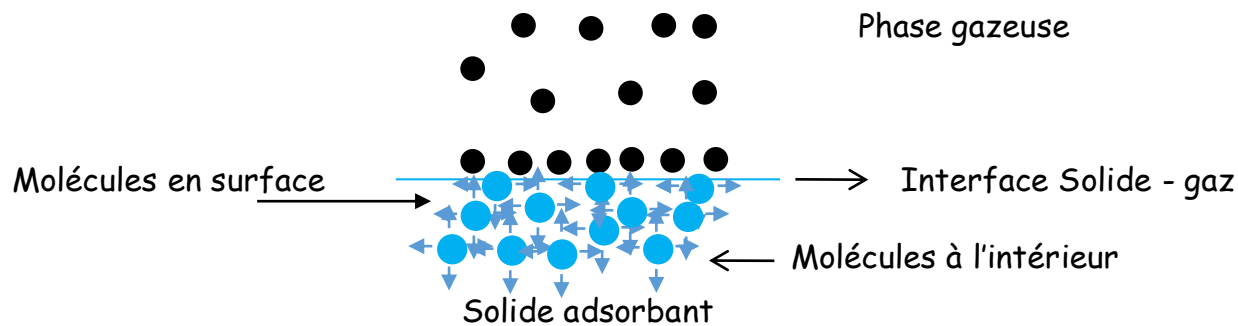
---

Le Chargé des cours

Professeur Nacer BEZZI

## Chapitre IV : Adsorption des gaz

Soit un système solide - gaz :



Les molécules, ions ou atomes de la couche superficielle sont soumises à des forces dissymétriques. Il en résulte un champ de force attractif vers l'intérieur.

### Conséquence

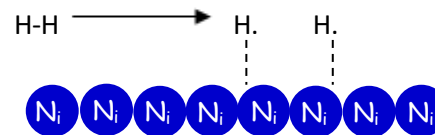
Il y a attraction des molécules d'un gaz ou d'un liquide par la surface solide (fixation) : *c'est le phénomène d'adsorption.*

L'énergie d'interaction entre le solide et le gaz est légèrement supérieure à  $E_I$  de l'espèce gazeuse.

On distingue 2 catégories de forces attractives :

- les forces de nature physique : causées par les forces de Van der Waals. Ces forces ne détruisent pas l'intégrité de la molécule adsorbée et correspondent à des énergies faibles.
- les forces de nature chimique : responsables des liaisons chimiques entre atomes ou ions. Ces forces détruisent l'individualité des molécules. Les énergies mises en jeu sont alors élevées.

**Exemple** : Adsorption de  $H_2$  sur Ni : l'hydrogène se dissocie avant de s'adsorber.



Adsorption de Na (vapeur) sur le tungstène : il y a un transfert d'électrons.

## I. Types d'adsorption et leurs caractéristiques

Il existe deux types d'adsorption :

- Adsorption physique ou physisorption
- Adsorption chimique ou chimisorption

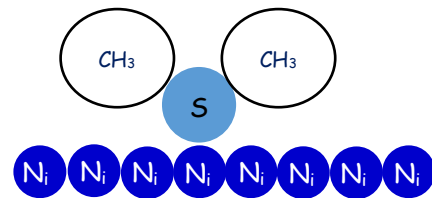
L'adsorption physique présente un intérêt particulier, car elle permet de mesurer la surface spécifique des solides adsorbants, la taille moyenne des pores et leurs distributions.

L'adsorption physique est causée par des forces faibles du type Van der Waals qui sont des forces attractives comme les interactions entre dipôle - dipôle.

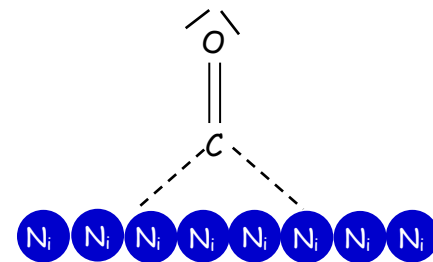
Dans le cas de l'adsorption chimique, il y a formation des liaisons chimiques de type covalente (avec un caractère ionique plus ou moins prononcé) entre l'espèce adsorbée et les atomes superficiels du solide : réactions chimiques (les énergies mises en jeu sont élevées).

L'existence d'une telle réaction chimique impose des conditions de localisation de l'adsorption à l'endroit où la formation de la liaison est la plus favorable : site d'adsorption.

### Exemple



Adsorption de diméthylsulfure par le Ni sur le site monoatomique



Adsorption sur un site métallique biatomique

Le phénomène d'adsorption est accompagné du processus inverse de désorption, restituant la molécule  $x$  de départ. Il y a un dégagement de chaleur (processus exothermique). La chaleur dégagée peut être faible ou forte selon le type d'adsorption.

$$\Delta H_{\text{ads}} (\text{chimique}) > \Delta H_{\text{ads}} (\text{physique})$$

Expérimentalement, il est fréquemment possible de distinguer entre les deux types d'adsorption en utilisant les critères mentionnés dans le tableau suivant.

| Propriétés                                       | Adsorption physique              | Adsorption chimique             |
|--------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Liaisons entre gaz - solide                      | Forces physiques (Van der Waals) | Liaisons chimiques              |
| Chaleur d'adsorption ( $\Delta H_{\text{ads}}$ ) | Exothermique ( $< 10$ kcal/mol)  | Exothermique ( $> 10$ kcal/mol) |
| Température du processus                         | Basse                            | Elevée                          |
| Désorption                                       | Facile                           | Difficile                       |
| Spécificité                                      | Non spécifique                   | Spécifique (sites actifs)       |

### Exemple

La chimisorption de l' $\text{O}_2$  sur les métaux à une chaleur d'adsorption :  $\Delta H_{\text{ads}} = 100$  kcal/mol

Les chaleurs de chimisorption sont comparables à celles des réactions chimiques (20 - 50 kcal/mol). La chaleur d'adsorption varie considérablement avec le degré de recouvrement tel que  $\theta$  :

$$\theta = n_a / n_{max}$$

$n_a$  : nombre de moles adsorbées

$n_{max}$  : nombre de moles pour une monocouche.

## II. Chaleur d'adsorption

La chaleur d'adsorption peut être obtenue soit par des mesures colorimétriques, soit par un calcul basé sur les isothermes d'adsorption.

En effet, d'après la relation de Clapeyron pour un équilibre  $L \rightleftharpoons V$  à T constante on obtient :

$$d \ln P / dT = \Delta H / RT^2$$

P : pression de vapeur saturante

$\Delta H$  : Enthalpie de vaporisation

Si le processus d'adsorption est réversible, il devient comparable au processus de condensation d'une vapeur :

Gaz condensé sur un solide  $\rightleftharpoons$  Gaz désorbé

$G \rightleftharpoons GS$

Phase gazeuse

Phase condensée

On a alors l'équation analogue à la précédente :

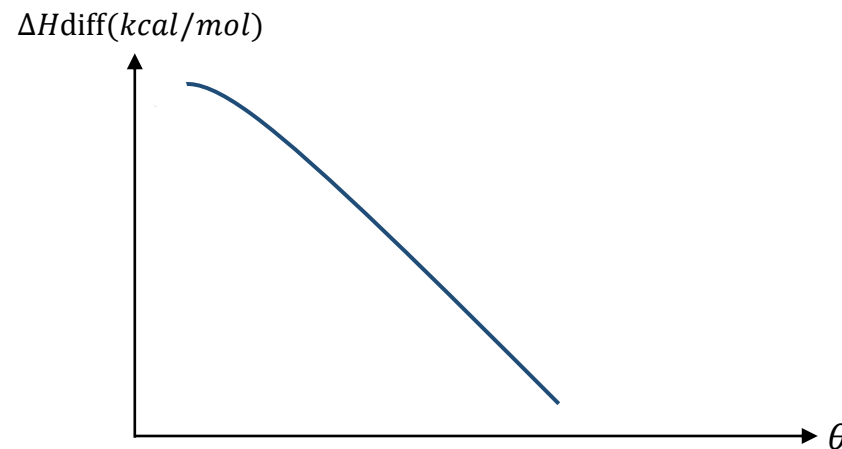
$$d\ln P/dT = \Delta H(\text{desp})/RT^2 = -\Delta H(\text{ads})/RT^2$$

Dans un domaine de température  $T_1 - T_2$  faible ( $\Delta T \cong 10^\circ$ ) on peut supposer  $\Delta H$  constant.

$$\Rightarrow \ln P_2/P_1 = \Delta H_a/R[1/T_2 - 1/T_1]$$

$P_1$  et  $P_2$ , pressions nécessaires pour produire la même adsorption de gaz aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .

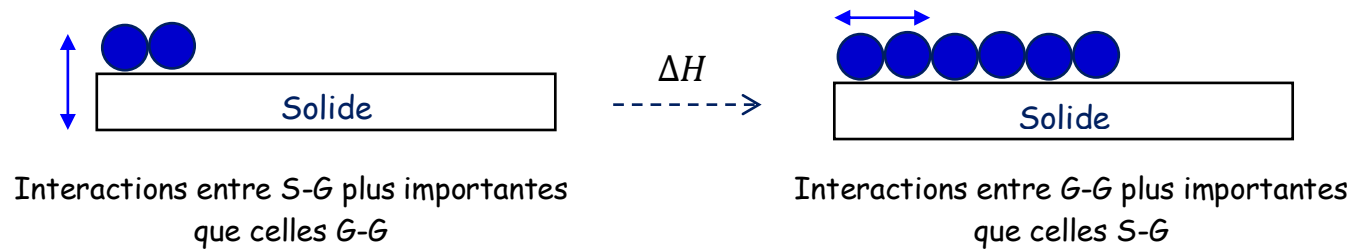
Variation de la chaleur d'adsorption différentielle en fonction du degré de recouvrement de  $H_2/Ni$ , obtenue par évaporation du métal sous vide et sa condensation sur un support solide est donnée par la figure suivante.



Chapitre IV : Adsorption des gaz

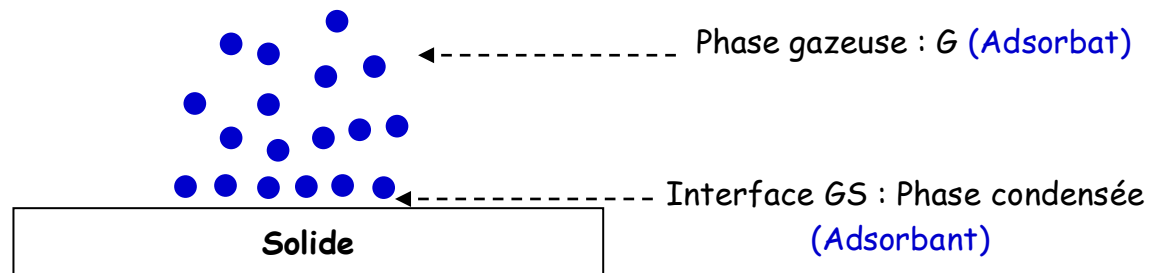
Le taux de recouvrement :  $\theta = n_a/n_{\text{max}}$

On remarque que  $\Delta H(\text{diff})$  diminue quand  $\theta$  augmente car quand on augmente  $n_a$  l'interaction entre les molécules gazeuses devient importante alors  $\Delta H$  gaz - solide diminue.



### III. Etude des isothermes d'adsorption

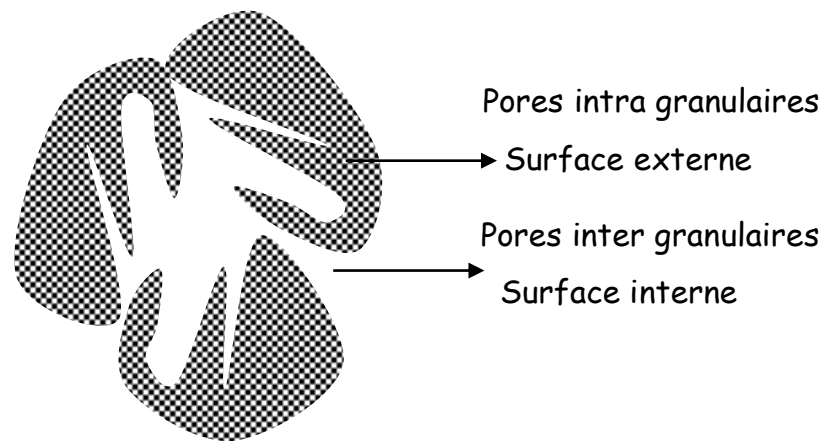
Soit un système solide - liquide :



Chapitre IV : Adsorption des gaz

La quantité  $x$  de gaz adsorbée (fixée) par  $m$  grammes de solide dépend de  $T$  et de  $P$ . L'étude de  $x/m = f(P)$  à  $T$  donnée s'appelle isotherme d'adsorption.

La nature de ces isothermes est liée à la porosité des solides. En effet, certains solides présentent un réseau cristallin à l'intérieur duquel des molécules étrangères peuvent pénétrer en position interstitielle ; il s'agit d'un phénomène peu fréquent. La surface d'un solide où a eu lieu l'adsorption est par contre exclusivement la surface du réseau cristallin. Cependant, beaucoup de solides se présentent sous forme de grains poreux du fait de la présence d'anfractuosités (fissures, trous, ..) (Une telle propriété est souhaitable dans le cas des catalyseurs car elle conduit à une surface spécifique grande). Il existe alors une surface externe du grain (pores intragranulaires), celle de son enveloppe macroscopique comme les pores étaient pleins et une surface interne (pores intergranulaires) qui est celle des pores.



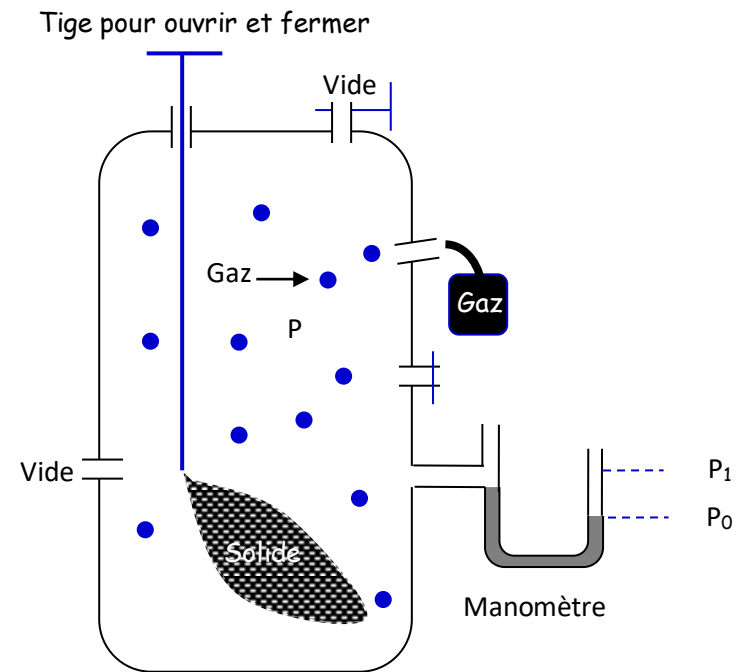
On classe les pores en trois catégories de taille:

- Les micropores de largeur des pores inférieure à 25 Å

- Les mésopores de largeur des pores comprise entre 25 - 500 Å
- Les macropores de largeur des pores supérieure à 500 Å

Les isothermes d'adsorption, correspondant à l'équilibre  $G \leftrightarrow GS$  sont obtenues par trois techniques expérimentales : **Gravimétrie ; Chromatographie ; Manométrie.**

**Exemple :** Technique basée sur la manométrie



Expérimentalement, on peut déterminer la quantité x adsorbée par une pression donnée.

A  $t = 0$  : l'ampoule que contient le solide est fermée  $\Rightarrow$  pas de contact  $S - G \Rightarrow$  pas d'adsorption, la pression du gaz à l'intérieur est  $P$ .

A  $t_1 \neq 0$  : On ouvre l'ampoule, il y a contact  $S - G$ , il y a une partie du gaz qui est adsorbée par le solide, la nouvelle pression du gaz à l'intérieur est  $P_1$ .

A  $t_2 \neq 0$  : On ouvre une deuxième fois l'ampoule, il y a une autre partie du gaz qui est adsorbée par le solide, la nouvelle pression du gaz à l'intérieur est  $P_2$ . Ainsi de suite jusqu'à l'équilibre d'adsorption.

Soit à

- $t = 0 : PV = n_0RT$
- $t_1 \neq 0 : P_1V = n_1RT$
- $t_2 \neq 0 : P_2V = n_2RT$
- $t_3 \neq 0 : P_3V = n_3RT$

.....

La quantité adsorbée :  $n_0 - n_1 = (P - P_1) V/RT$

$P_2$

$P_3$

.

Les isothermes expérimentales de physisorption peuvent être tracées jusqu'à la pression limite de vapeur saturante  $P_0$  à laquelle la condensation apparaît.

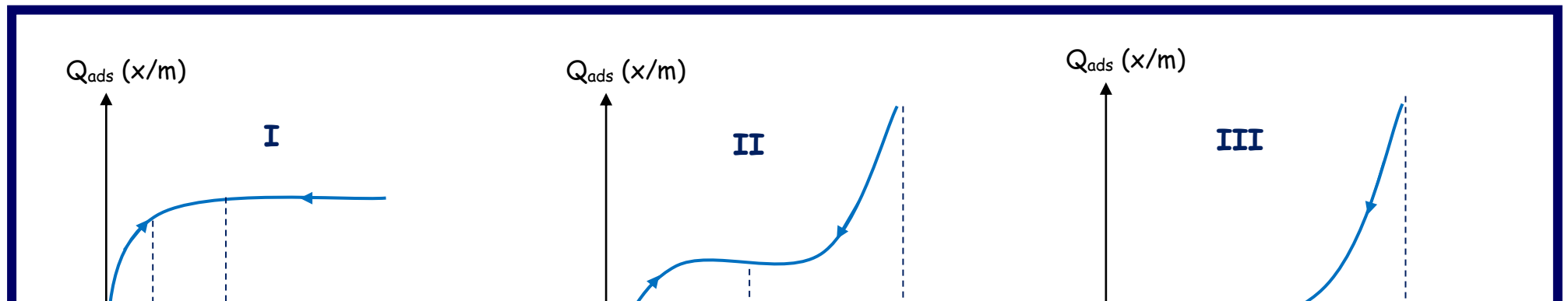
Quantité adsorbée ( $Q_{ads}$ )

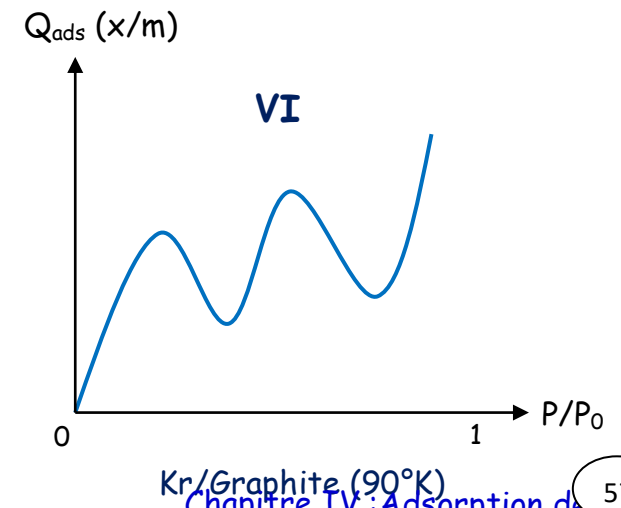
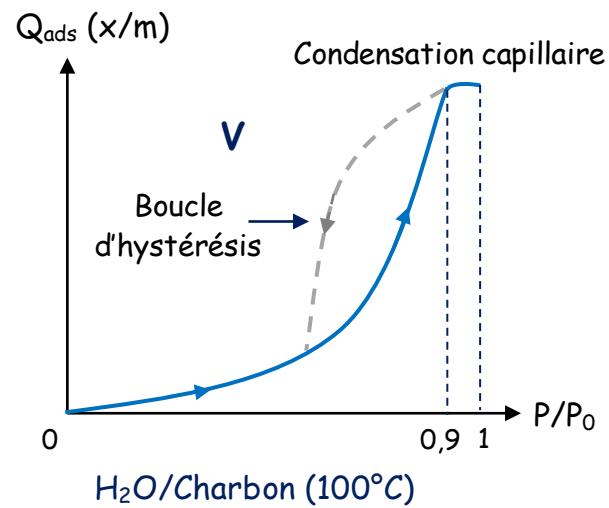


constante

## IV. Classification des isothermes d'adsorption

L'examen d'un très grand nombre de résultats expérimentaux permet de classer les isothermes d'adsorption, selon l'IUPAC (l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée) en six types :



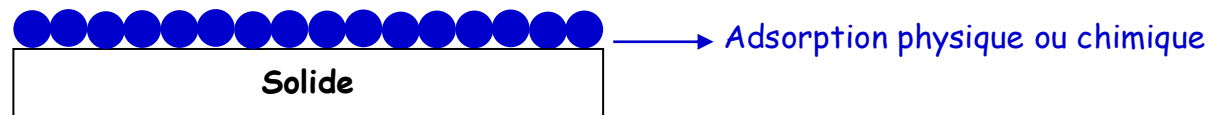


Kr/Graphite (90°K)  
Chapitre IV : Adsorption de

57

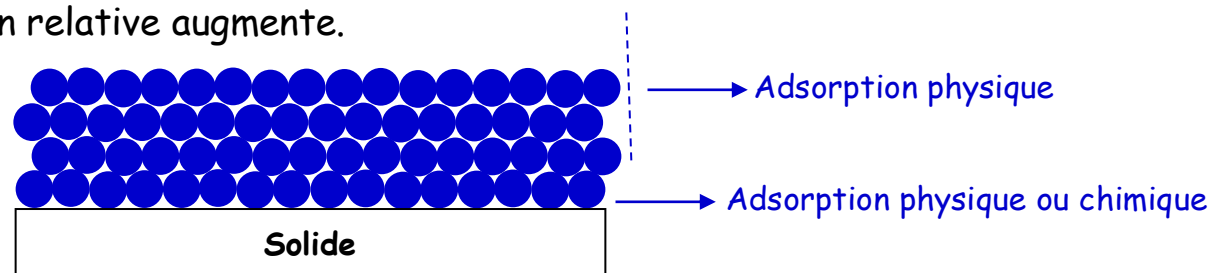
## Isotherme de type I

Elle représente la formation d'une couche monomoléculaire, adsorbée sur un solide microporeux de diamètre inférieur à 25 Å.



### Isotherme de type II

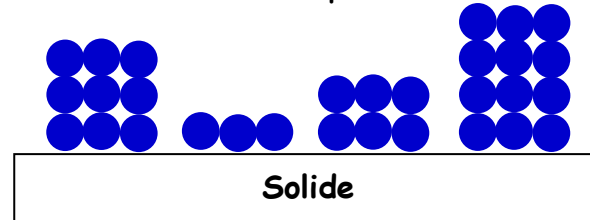
Il y a apparition d'une couche polymoléculaire une fois que la couche monomoléculaire est formée. Elle se rencontre fréquemment sur un solide peu poreux de diamètre des pores supérieur à 200 Å. Le point d'inflexion indique que la 1<sup>ère</sup> couche est totalement saturée, la polycouche pouvant alors se produire au fur et à mesure que la pression relative augmente.



### Isotherme de type III

Elle indique la formation d'une couche polymoléculaire dès le début de l'adsorption et avant que la surface n'ait été recouverte complètement d'une couche monomoléculaire que la couche monomoléculaire est formée. Elle se rencontre fréquemment sur un solide peu poreux de diamètre des pores supérieur à 200 Å

Le point d'inflexion indique que la 1<sup>ère</sup> couche est totalement saturée, la polycouche pouvant alors se produire au fur et à mesure que la pression relative augmente. C'est le cas où la surface du solide n'est pas homogène et que l'adsorption se fait sur des sites préférentiels où les forces sont les plus intenses.



Généralement les isothermes des types I, II et III sont réversibles : le chemin de la désorption suit celui de l'adsorption.

### Isothermes des types IV et V

Elles se produisent sur des solides ayant des pores de diamètre 25-500 (Å). L'isotherme IV est similaire à celle du type II (la polycouche démarre quand la monocouche soit complètement remplie), quand la pression augmente des couches polymoléculaires se forment. Comme pour les types III et V, la polycouche se forme avant que la monocouche soit totalement remplie.

Ces deux types d'isothermes présentent un phénomène d'hystérésis (boucle) dû à la condensation capillaire. La condensation capillaire est enregistrée quand les gaz sont facilement liquéfiables et sur des solides ayant un diamètre des pores compris entre 25 et 500 Å (mésopores). En effet, aux pressions élevées  $\approx 0,9$  il y a apparition de boucle d'hystérésis.

Quand la pression relative est comprise entre 0,4 et 0,9 (domaine d'hystérésis) le chemin d'adsorption est différent de celui de la désorption. La surface du solide retient des molécules d'adsorbant lors de la désorption.

### Isotherme de type VI

C'est un cas rare rencontré lors de l'adsorption d'un gaz rare ou de méthane sur le graphite.

La partie basse pression des isothermes ( $0 < P/P_0 < 0,4$ ) est utilisée pour la mesure des aires spécifiques des solides.

La partie basse pression des isothermes ( $0,4 < P/P_0 < 0,9$ ) est utilisée pour la détermination de la porosité des solides.

## V. Modèles mathématiques des isothermes d'adsorption

### V.1. Isotherme d'adsorption en couche monomoléculaire : Langmuir

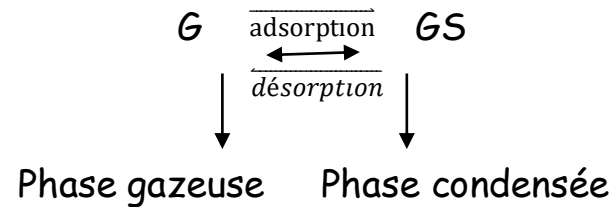
L'adsorption en couches monomoléculaires est relative à l'isotherme du type I. Elle est traduite mathématiquement par la théorie de Langmuir. Cette théorie repose sur les hypothèses suivantes :

- L'adsorption se fait en couche monomoléculaire
- Il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées
- Les sites d'adsorption à la surface du solide sont tous énergétiquement uniformes
- Chacun des sites ne peut fixer qu'une seule molécule.

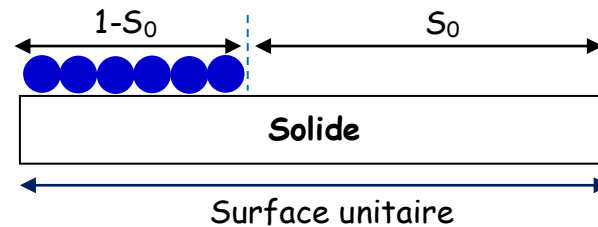
### Raisonnement cinétique

On considère que l'équilibre d'adsorption est dynamique : il résulte de l'équilibre entre deux phénomènes inverses :

- fixation du gaz sur le solide : adsorption
- désorption du gaz adsorbé : désorption



Soit un solide d'une surface unitaire



Appelons  $S_0$  la fraction unitaire non recouverte par les molécules (surface libre) et  $1 - S_0$  la surface recouverte.

La vitesse d'adsorption est proportionnelle aux nombres de molécules qui arrivent à la surface (donc à  $P$ ) et à la surface libre  $S_0$ .

$$V_a = K_a \cdot P \cdot S_0 \text{ (mol. s}^{-1}, \text{ m}^{-2}\text{)}$$

$K_a$  : constante de vitesse d'adsorption, caractéristique de la nature du solide et du gaz à une température donnée.

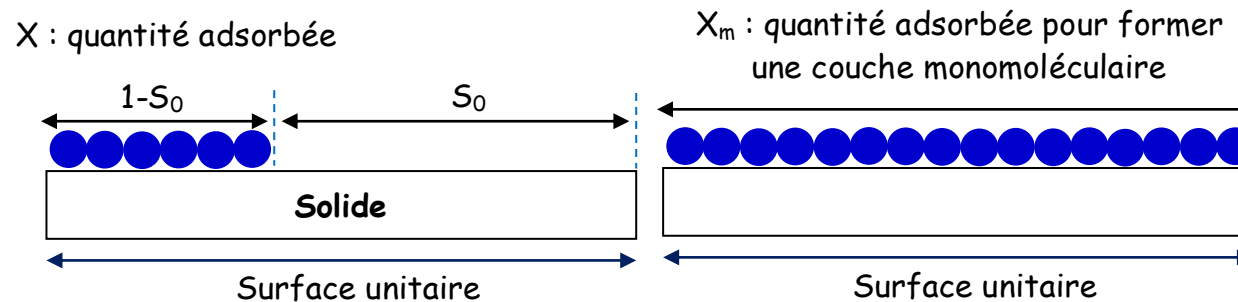
La vitesse de désorption est proportionnelle à la surface occupée par les molécules  $(1 - S_0)$ .

$$V_d = K_d (1 - S_0) ; K_d : \text{constante de vitesse de désorption}$$

A l'équilibre : la vitesse d'adsorption est égale à la vitesse de désorption :  $V_a = V_d$

$$K_a \cdot P \cdot S_0 = K_d (1 - S_0) \Rightarrow \frac{K_a}{K_d} P = \frac{1 - S_0}{S_0}$$

$X$  : quantité adsorbée sur la surface  $1 - S_0$  ;  $X_m$  : quantité adsorbée pour former une couche monomoléculaire



$$\left. \begin{array}{l} X \longrightarrow 1 - S_0 \\ X_m - X \longrightarrow S_0 \end{array} \right\} \Rightarrow (X_m - X) (1 - S_0) = S_0 X$$

$$\Rightarrow \frac{1 - S_0}{S_0} = \frac{X}{X_m - X}$$

On définit un taux de recouvrement de surface par :

$$\theta = \frac{X}{X_m} = \frac{\text{Nombre de molécules adsorbées}}{\text{Nombre de molécules d'une monocouche}}$$

Il vient que :  $\frac{1 - S_0}{S_0} = \frac{X}{X_m - X} = \frac{\theta}{1 - \theta}$

En posant  $b = \frac{K_a}{K_d}$  (Coefficient d'adsorption)

On obtient :  $bP = \frac{\theta}{1 - \theta} \Rightarrow \theta = \frac{bP}{1 + bP}$

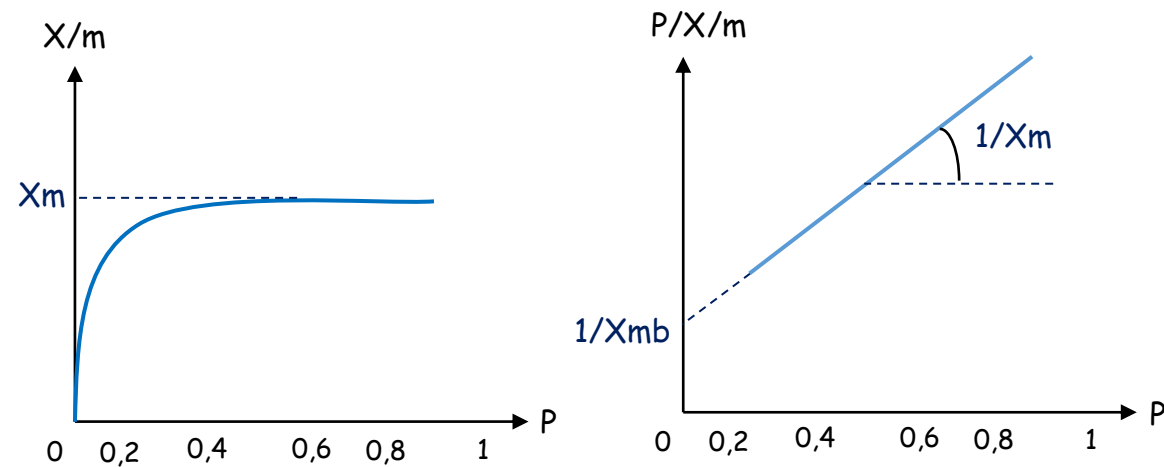
Soit,  $X = X_m \frac{bP}{1 + bP}$  (Equation de Langmuir)

Pour m grammes de solide adsorbant, on a :

$$X/m = X_m \frac{bP}{1 + bP} \text{ (Equation d'état de Langmuir)}$$

La forme linéaire de l'équation de Langmuir s'écrit :

$$P/X/m = \frac{1}{X_m} P + \frac{1}{X_m b} \text{ (Equation linéaire de Langmuir)}$$



- Aux basses pressions :  $bP \ll 1 \Rightarrow X = X_m bP$
- Aux hautes pressions :  $bP \gg 1 \Rightarrow X = X_m$
- Aux pressions intermédiaires :  $X = X_m \frac{bP}{1+bP}$

L'isotherme doit être traduite par cette équation mais elle peut être exprimée d'une autre manière. En effet :

- Aux basses pressions :  $X$  varie linéairement comme  $P^1$
- Aux hautes pressions :  $X$  est indépendant de  $P$ , il varie comme  $P^0$
- On peut admettre qu'aux pressions intermédiaires :  $X$  varie comme  $P^n$  ( $0 \leq n \leq 1$ )

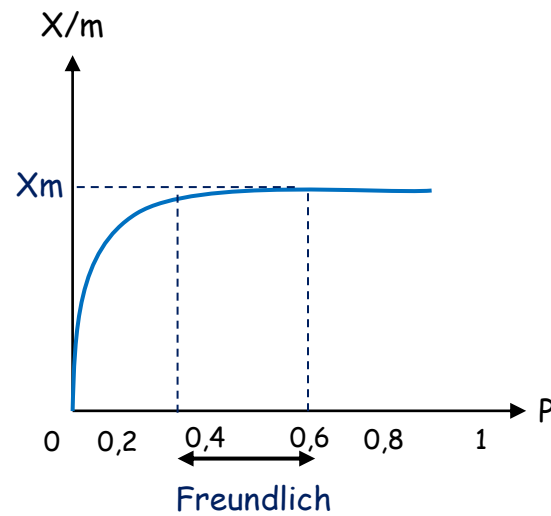
$$X = X_m b P^n$$

$$n \rightarrow 1 : X = X_m b P = KP$$

$$n \rightarrow 0 : X = X_m b = K$$

$$0 \leq n \leq 1 : X = KP^n$$

$$X = KP^n \text{ (Equation de Freundlich, cas particulier de Langmuir)}$$



## V.2. Isothermes d'adsorption en couches polymoléculaires

L'adsorption en couches polymoléculaires est relative aux isothermes des types II à V.

Il existe 4 théories principales :

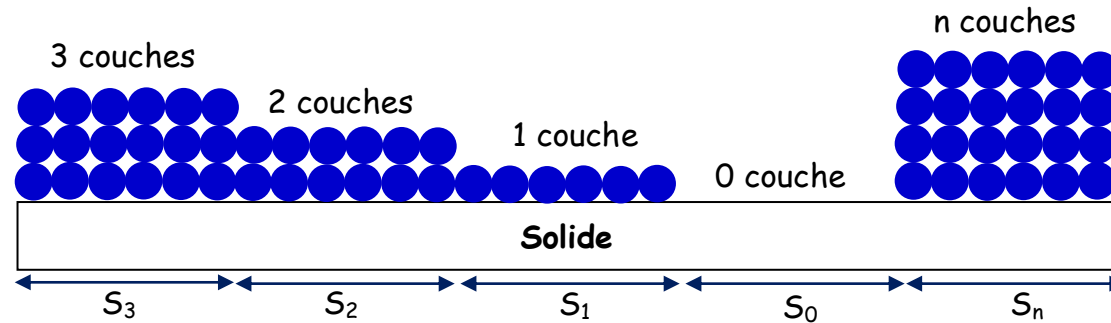
1. Théorie de B.E.T (Brunauer, Emmett et Teller)
2. Théorie de F.H.H (Frankel, Halsey et Hill)
3. Théorie du potentiel de Polanyi
4. Théorie de D.R.K (Dubinin, Raduskevitch et Kaganer)

### V.2.1. La théorie de B.E.T

Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- Pas d'interaction entre les molécules adsorbées
- La surface du solide est énergétiquement uniforme

BET a développé la théorie de Langmuir pour permettre son application dans le cas de l'adsorption en polycouches.

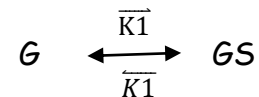


Soient :  $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_n$ , surfaces recouvertes par 0, 1, 2, 3, ..... couches de molécules.

Comme dans le raisonnement de Langmuir, à l'équilibre les vitesses d'adsorption et de désorption sont égales.

$V_a$  : nombres de molécules qui arrivent à la surface, soit  $P$  et à la surface libre

$V_d$  : surface occupée par les molécules adsorbées



$\overline{K_1}$  : constante de vitesse adsorption

$\overline{K_1}$  : constante de vitesse de desorption

- Couche d'ordre 0 :  $\overrightarrow{K1}.P.S_0 = \overrightarrow{K1}.S_1$  ; soit  $S_1 = \frac{\overrightarrow{K1}}{\overrightarrow{K1}}P.S_0$
- Couche d'ordre 1 :  $\overrightarrow{K2}.P.S_1 = \overrightarrow{K2}.S_2$  ; soit  $S_2 = \frac{\overrightarrow{K2}}{\overrightarrow{K2}}P.S_1$
- Couche d'ordre 2 :  $\overrightarrow{K3}.P.S_2 = \overrightarrow{K3}.S_3$  ; soit  $S_3 = \frac{\overrightarrow{K3}}{\overrightarrow{K3}}P.S_2$
- Couche d'ordre 3 :  $\overrightarrow{K4}.P.S_3 = \overrightarrow{K4}.S_4$  ; soit  $S_4 = \frac{\overrightarrow{K4}}{\overrightarrow{K4}}P.S_3$
- Couche d'ordre 4 :  $\overrightarrow{K5}.P.S_4 = \overrightarrow{K5}.S_5$  ; soit  $S_5 = \frac{\overrightarrow{K5}}{\overrightarrow{K5}}P.S_4$

Une hypothèse fondamentale faite à ce stade est de considérer que l'adsorption sur la couche 1 et les suivantes est identique à la condensation et réversiblement la désorption est identique à l'évaporation. Si ce phénomène est caractérisé par la constant d'équilibre b on peut écrire :

$$\frac{\overrightarrow{K2}}{\overrightarrow{K2}} = \frac{\overrightarrow{K3}}{\overrightarrow{K3}} = \frac{\overrightarrow{K4}}{\overrightarrow{K4}} = \frac{\overrightarrow{K5}}{\overrightarrow{K5}} = \dots\dots = \frac{\overrightarrow{K}}{\overrightarrow{K}} = b \text{ et } \frac{\overrightarrow{K1}}{\overrightarrow{K1}} = b_1$$

b : coefficient d'adsorption à partir de la 1<sup>ère</sup> couche

b<sub>1</sub> : coefficient d'adsorption à partir de la couche d'ordre 0

Il vient :  $S_1 = b_1 P.S_0$

$$S_2 = b P.S_1$$

$$S_3 = b P.S_2$$

.....

On pose  $bP = x$  et  $b_1P = Cx$  ( $C = \frac{b_1}{b}$ )

On a ainsi :

$$S_1 = Cx.S_0$$

$$S_2 = x.S_1 = Cx^2S_0$$

$$S_3 = x.S_2 = Cx^3S_0$$

.....

.....

Si  $V$  : volume total adsorbé

$V_m$  : volume adsorbé nécessaire pour former une couche monomoléculaire sur toute la surface du solide.

$$V_m \rightarrow S_0 + S_1 + S_2 + S_3 + \dots$$

$$V \rightarrow 0.S_0 + 1.S_1 + 2.S_2 + 3.S_3 + \dots$$

$$C = \frac{V}{V_m} = \frac{0S_0 + 1S_1 + 2S_2 + 3S_3 + \dots}{S_0 + S_1 + S_2 + S_3 + \dots} = \frac{CxS_0 + 2Cx^2S_0 + 3Cx^3S_0 + \dots}{S_0 + CxS_0 + Cx^2S_0 + Cx^3S_0 + \dots} = \frac{Cx(1+2x+3x^2 + \dots)}{1+Cx(1+x+x^2 + \dots)}$$

La dérivée de  $1 + x + x^2 + \dots = 1 + 2x + 3x^2 + \dots$

$$1 + x + x^2 + \dots = \frac{1}{1-x} \Rightarrow \left(\frac{1}{1-x}\right)' = \frac{1}{(1-x)^2}$$

La dérivée de  $1 + 2x + 3x^2 + \dots = \frac{1}{(1-x)^2}$

$$\Rightarrow \frac{V}{V_m} = \frac{Cx \frac{1}{1-x^2}}{1+Cx \frac{1}{1-x}} \Rightarrow \frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{(1-x)(1+(C-1)x)}$$

$$\frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{(1-x)(1+(C-1)x)} \text{ (Equation d'état de BET)}$$

$$x \rightarrow 1 ; \frac{V}{V_m} \rightarrow 1 \quad \text{on a alors : } P \rightarrow P_0$$

Comme  $x = bP \Rightarrow b P_0 = 1 \Rightarrow b = 1/P_0 \Rightarrow x = P/P_0$  et  $C = b_1/b$

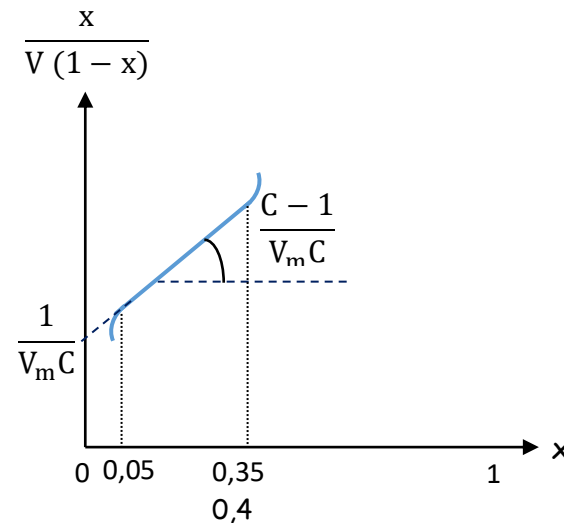
$C$  : constante caractéristique de l'adsorbant.

Aux faibles pressions l'isotherme de BET se confond avec celle de Langmuir :

$$x \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{1+(C-1)x} = \frac{Cx}{1+Cx}$$

L'équation de BET peut se mettre sous forme linéaire :

$$\frac{x}{V(1-x)} = \frac{C-1}{V_m C} x + \frac{1}{V_m C} \quad (\text{Equation linéaire de BET})$$



L'équation de BET est bien vérifiée dans le domaine :  $0.05 < x < 0.35$

## VI. Application de l'adsorption physique

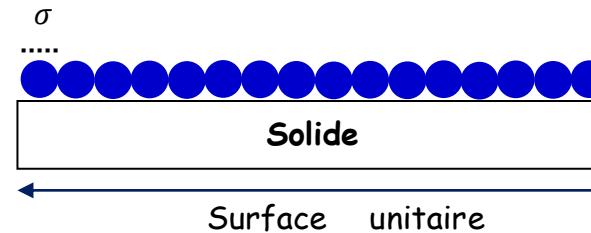
### VI.1. Détermination de la surface spécifique

La mesure de la surface spécifique  $S$  d'un solide se ramène, très fréquemment à la détermination d'un nombre  $N_m$  de molécules nécessaires pour former une couche monomoléculaire.

$$S = N_m \cdot \sigma$$

$N_m$  : Nombre de molécules nécessaires pour former  
une couche monomoléculaire

$\sigma$  : Surface occupée par une molécule



Le volume  $V_m$  est exprimé souvent en  $\text{Cm}^3$  de gaz par gramme de solide. Ce volume est ramené aux conditions normales de température et de pression :

$$\begin{array}{lcl} 1 \text{ mole de molécules de gaz} & \rightarrow N_A \text{ (Avogadro) molécules} & \rightarrow 22400 \text{ Cm}^3 \\ & N_m & \rightarrow V_m \end{array}$$

$$\Rightarrow N_m = \frac{V_m N_A}{22400} \quad (N_A = 6,023 \cdot 10^{23})$$

Si l'aire moléculaire  $\sigma$  est exprimée en  $\text{\AA}^2$  ( $1\text{Cm} = 10^{-10}\text{m}$ )

$$\Rightarrow S = N_m \cdot \sigma = \frac{V_m 6,023 \cdot 10^{23}}{22400} \sigma (10^{-20}) = 0,269 \cdot V_m \cdot \sigma$$

$S = 0,269 \cdot V_m (\text{Cm}^3) \cdot \sigma (\text{\AA}^2)$  : surface totale du solide en  $\text{m}^2$

La surface spécifique  $s = \frac{S}{m} (\text{m}^2/\text{g})$

$$S = 0,269 \cdot V_m \cdot \sigma$$

## VI.2. Détermination de la porosité d'un solide

Soit  $V_{\max}$  la quantité nécessaire pour remplir tous les pores du solide et  $d_l$  la densité du gaz liquéfié. Le volume poreux est donné par l'équation de Gurvitch :

$$V_p = \frac{V_{\max}}{d_l}$$

Cette équation est valable en faisant les hypothèses suivantes :

- Que le solide est très poreux de telle manière que la quantité de gaz adsorbée à la surface externe du solide est négligeable devant celle adsorbée dans les pores.
- De plus, cette équation est valable lorsque les molécules adsorbées sont suffisamment petites pour pouvoir pénétrer à l'intérieur des pores.

