

La liaison chimique

1. Introduction

Qu'est qu'une liaison chimique?

Les différents types de liaison chimique (ionique, covalente, métallique)

2. Représentation de Lewis (classique)

règle de l'octet

exemples

limites de validité

3. Représentation géométrique (3D) des molécules: théorie RPEV (VSEPR)

4: Approche quantique (combinaison d'orbitales atomiques)

Hybridation

5. Liaisons intermoléculaires (hors programme)

ponts hydrogène : propriétés uniques de l'eau, ADN,

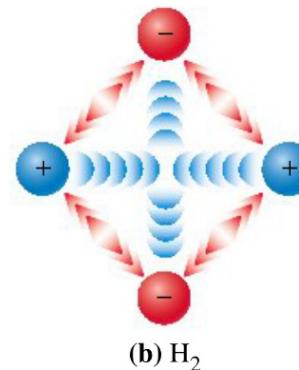
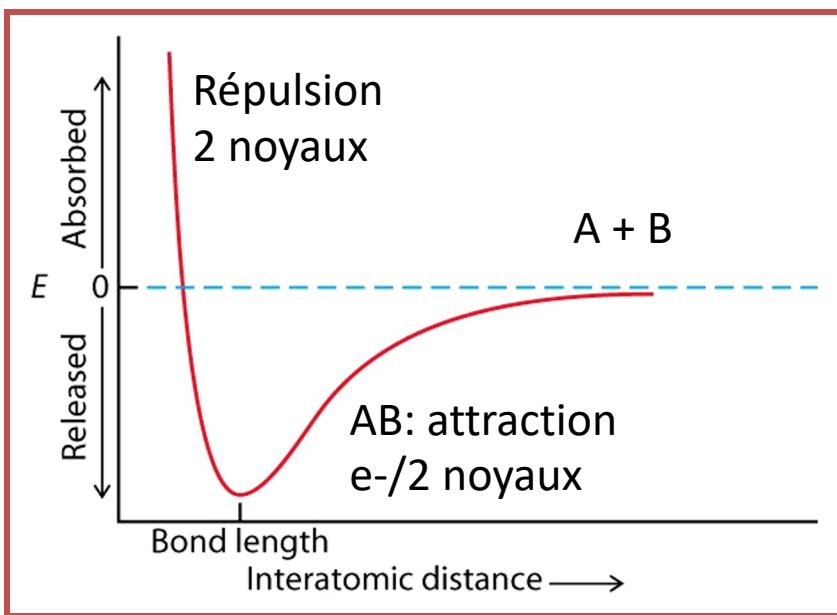
Van der Waals

Introduction

Liaison chimique

Forces électriques assurant la cohésion des molécules, résulte du **partage** des électrons entre atomes

Une liaison chimique se forme si l'arrangement des atomes résultant a une énergie plus faible que la somme des énergies des atomes séparés. Elle correspond toujours à un minimum **énergétique**.



Attraction:
noyaux /électrons

Répulsion:
noyaux/noyaux
électrons /électrons

- Formation de liaison : dégagement d'énergie
- Pour $d =$ longueur de liaison minimum énergétique, situation la plus stable

Courbe d'énergie potentielle en fonction de la longueur de liaison

Energie=0: par convention, énergie des atomes non liés

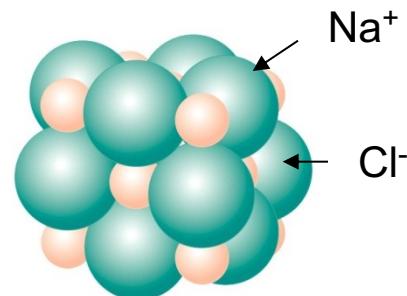
Types de Liaisons (différence d'électronégativité)

Liaison ionique (Liaison à caractère ionique)

Liaison entre **deux ions** de signe opposé.

Passage d'électrons de l'atome chargé positivement vers l'atome chargé négativement.

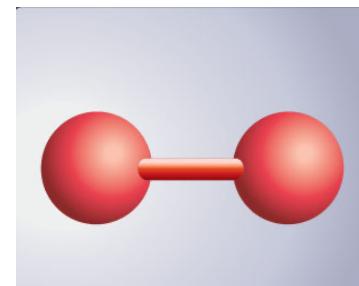
GRANDE DIFFERENCE D'ELECTRONEGATIVITE ($\Delta EN > 1.7$)



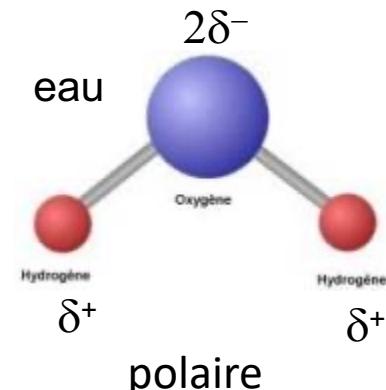
Liaison covalente

Partage d'électrons entre 2 atomes

Deux atomes d'électronégativité semblable
liaison covalente non polaire: O₂

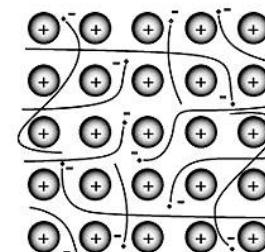


non polaire

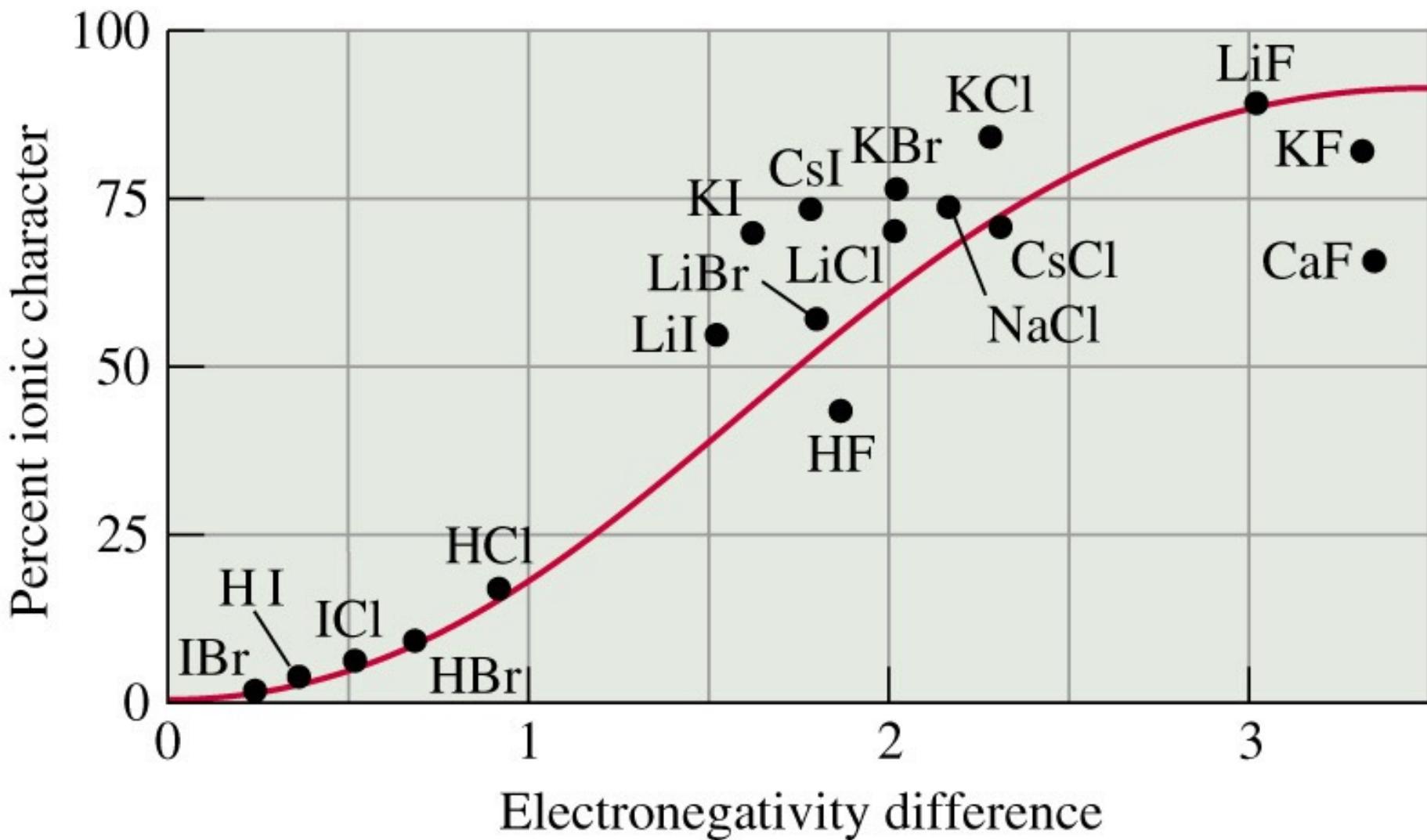


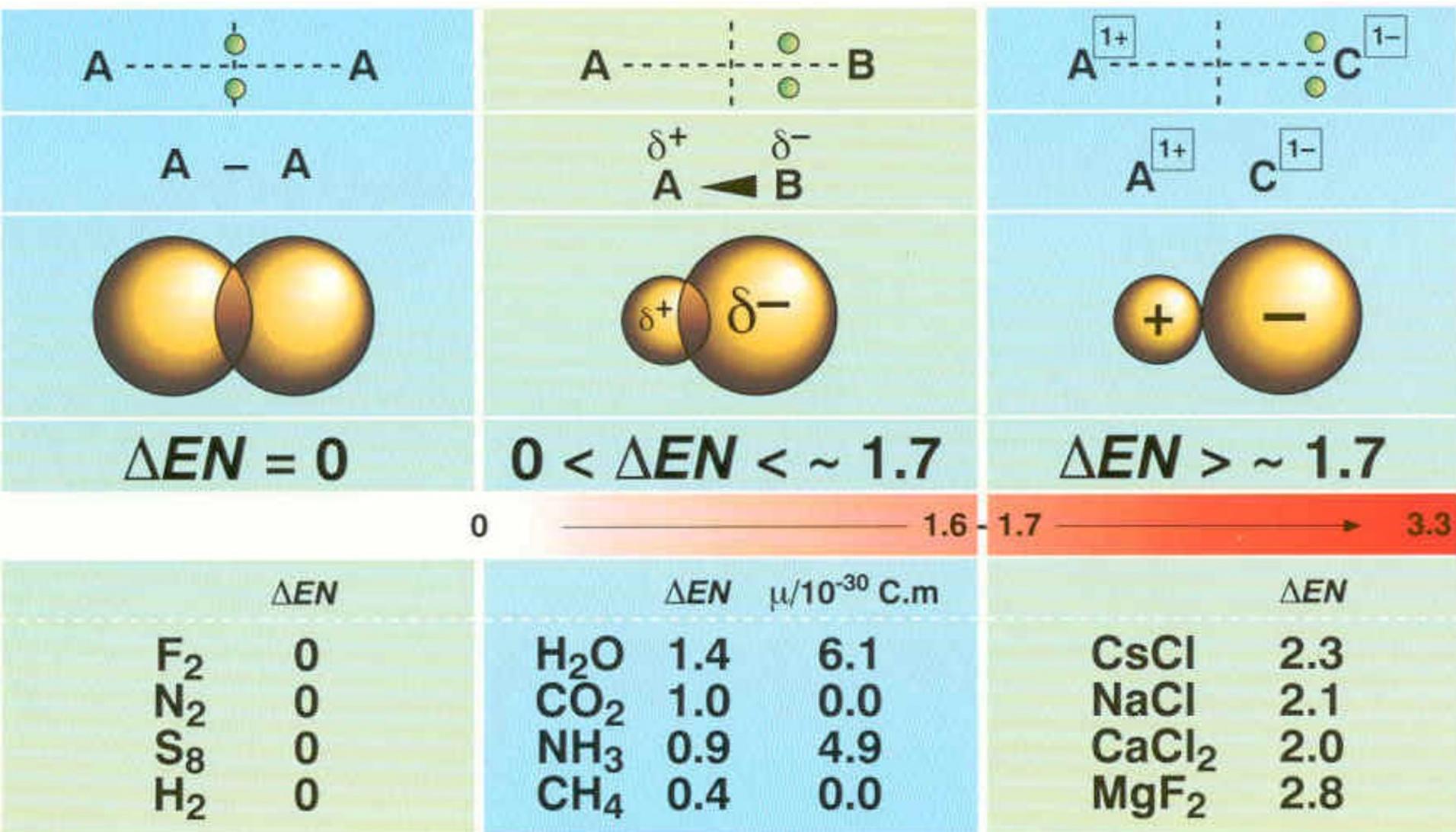
Liaison métallique

Partage d'électrons de valence entre tous les atomes dans un métal (electronégativité faible):
électrons libres qui permettent la conductivité électrique.



Caractère ionique et électronégativité



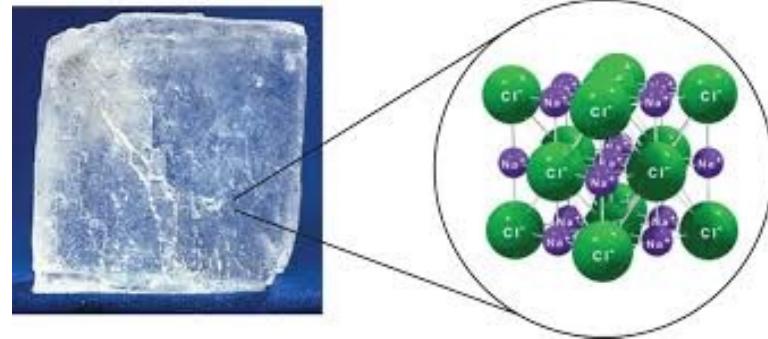


Propriétés des composés ioniques

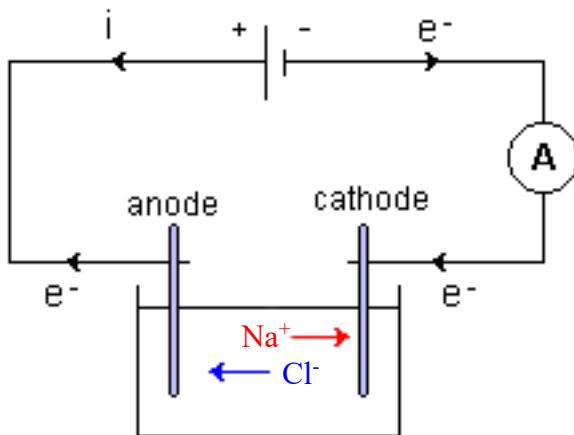
- Arrangements d'anions et de cations assemblés en **réseaux réguliers** pour donner le système d'énergie minimale.
- Energie de liaison forte,
Points de fusion élevés.
- Solubles dans l'eau.
Insolubles dans les solvants organiques.
Conduisent l'électricité en solution aqueuse.



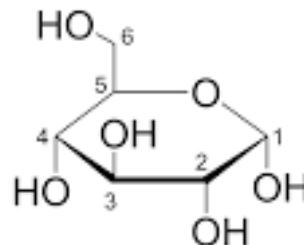
NaCl



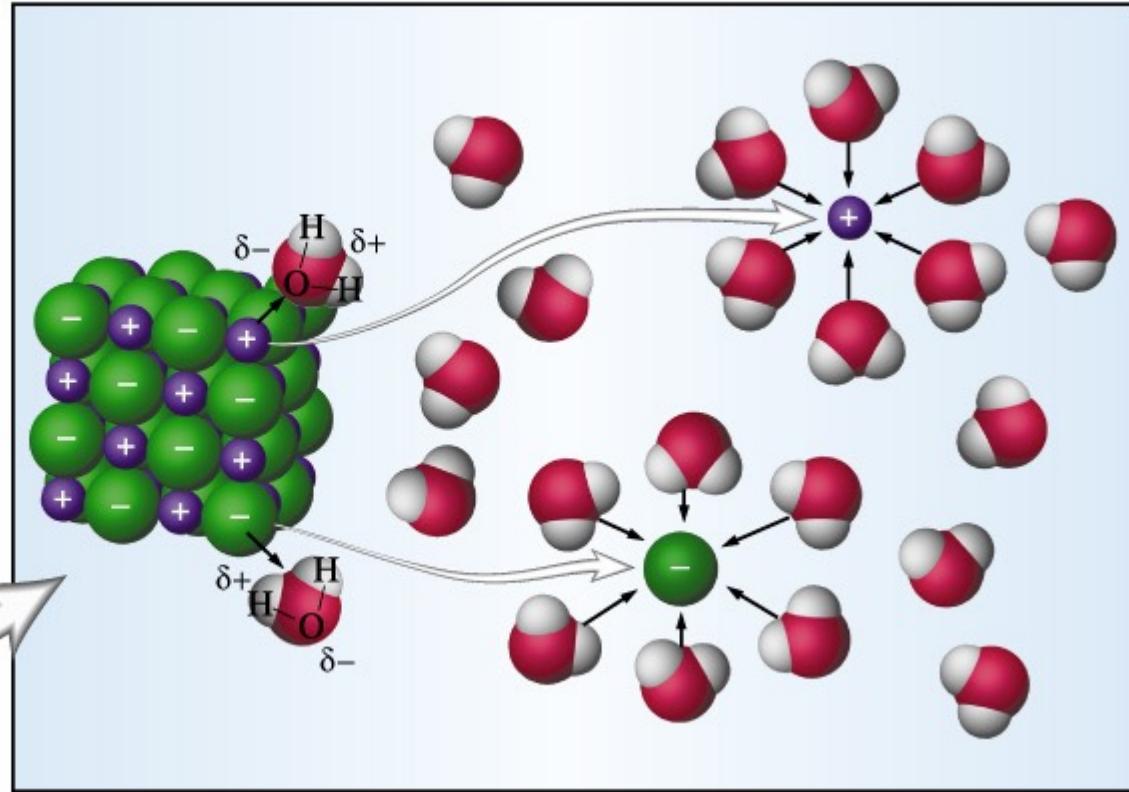
Expérience : conductibilité électrique des solutions



Les **anions** se déplacent vers l'**anode**, électrode reliée au pôle + du générateur.
Les **cations** se déplacent vers la **cathode**, électrode reliée au pôle - du générateur.
Dans les fils, les électrons conduisent le courant. En solution, les électrons sont absents et les porteurs de charge sont les cations et les anions.
Le sucre ne forme pas d'ions, donc le courant est nul.



Glucose
Polaire mais non ionique



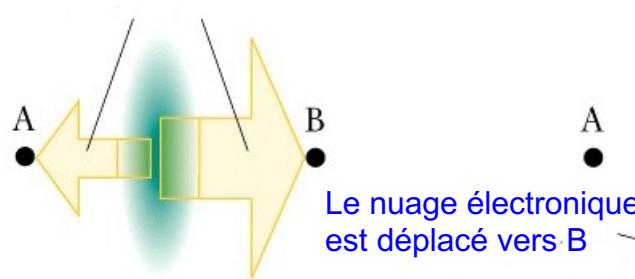
- NaCl solide ne conduit pas l'électricité, pas de charges mobiles
- Dans l'eau, NaCl (s) est en équilibre avec $\text{Na}^+(\text{aq})$ et $\text{Cl}^-(\text{aq})$ qui sont des charges mobiles et qui se déplacent avec le champ électrique

Liaison covalente

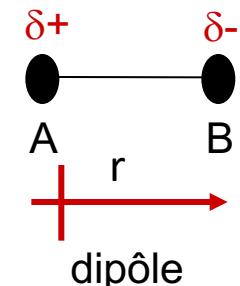
Liaisons polaires et non polaires

La force électroattractrice d'un atome engagé dans une liaison est quantifiée par son **électronégativité**. L'atome ayant la plus grande électronégativité a tendance à tirer les électrons liants vers lui. La densité électronique est donc déplacée du milieu de la liaison vers l'atome le plus électronégatif.

Pouvoir électroattracteur relatif



$\delta+$ = atome le moins électronégatif
 $\delta-$ = atome le plus électronégatif
charge partielle

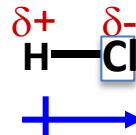


Exemples



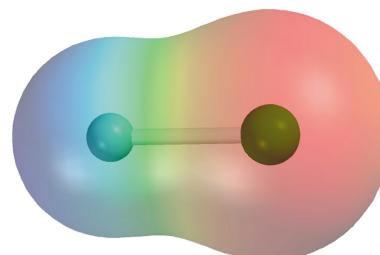
$$\Delta\text{EN} = 0$$

Liaison non polaire



$$\Delta\text{EN} = 3.16 - 2.2 = 0.96$$

Liaison polaire



Moment dipolaire HCl
 $\mu = r \delta [C \cdot m] = 1.05 \text{ Debye}$
1D = $3.34 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$

*convention (chimie)
dipôle orienté du + vers le -

Théorie de Lewis

Les fondements de la théorie de Lewis

- ▶ Les électrons, en particulier les **électrons de valence**, jouent un rôle fondamental dans les liaison chimiques
- ▶ Combinaison **métaux – non métaux** → les électrons de valence passent généralement des atomes des métaux aux atomes des non métaux. Il se forme des cations et des anions, combinés par des **liaisons ioniques**.
- ▶ Combinaison **non métaux – non métaux** → les atomes liés partagent un ou plusieurs doublets d'électrons de valence : **liaisons covalentes**.
- ▶ Lorsqu'ils perdent, reçoivent ou partagent des électrons au cours de la formation de liaisons, les atomes acquièrent généralement la configuration électronique d'un gaz noble (octet ou duet).



Gilbert N. Lewis

1	-1	+1	H	1,01	2,2	[2e]	2	II A
Hydrogène								
3	+1		Li	6,94	1,2		4	Be
Lithium							+2	Beryllium

→ prennent la configuration électronique de l'hélium ($1s^2$)

Autres éléments (sauf métaux de transition)



Règle du duet
(doublet)



Prennent la configuration électronique des autres gaz nobles ns^2np^6

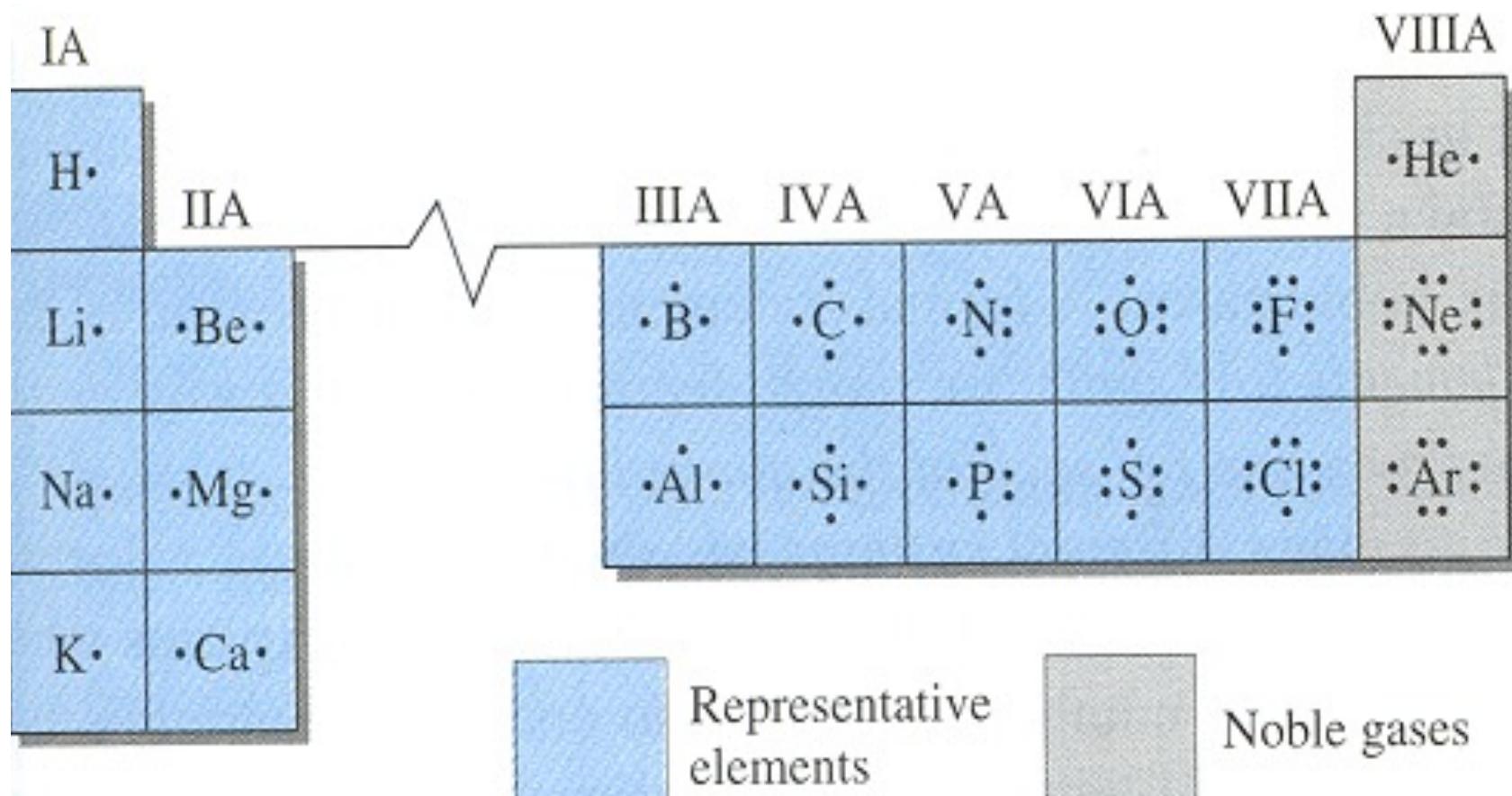


Règle de l'octet

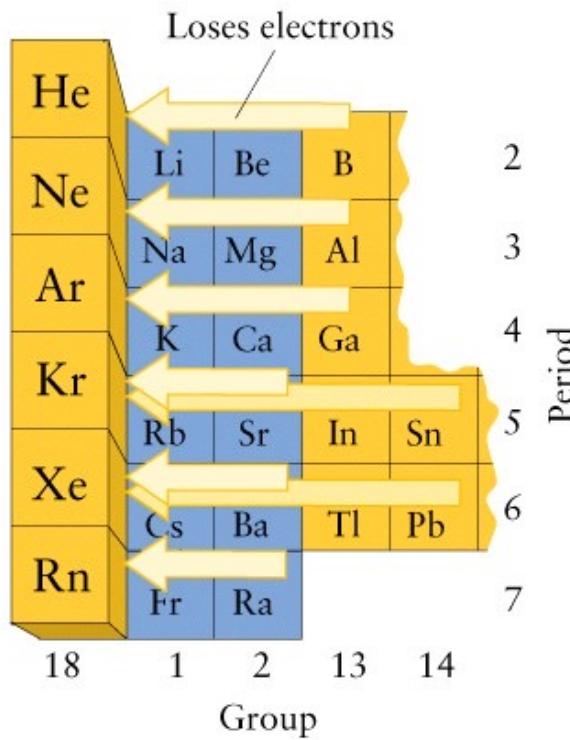
Représentation de Lewis pour les éléments

On représente la couche externe, de manière simplifiée, par des points symbolisant les **électrons de valence**. (Les éléments d'une même colonne ont la même structure de Lewis)

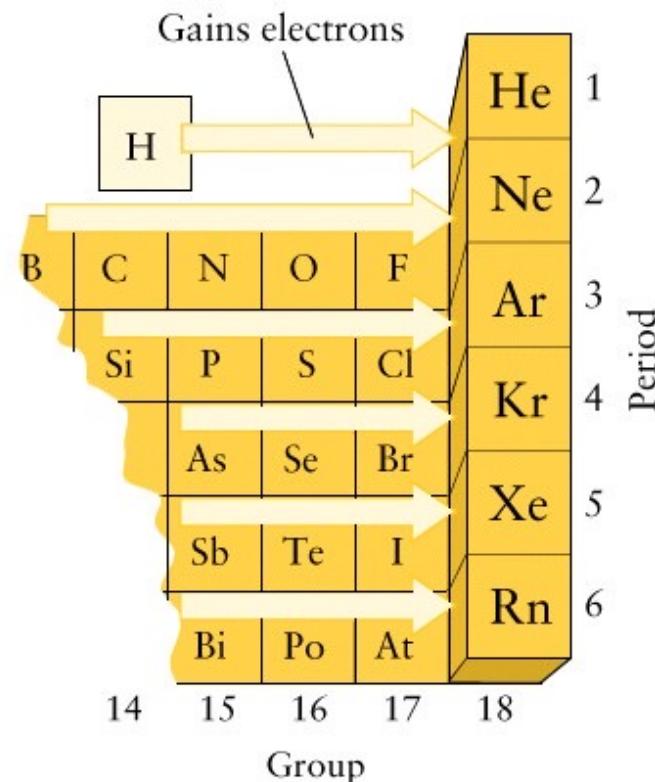
On inscrit les quatre premiers électrons de manière isolée, puis on groupe les électrons additionnels en **doublets**.



Structure de Lewis: Liaison ionique



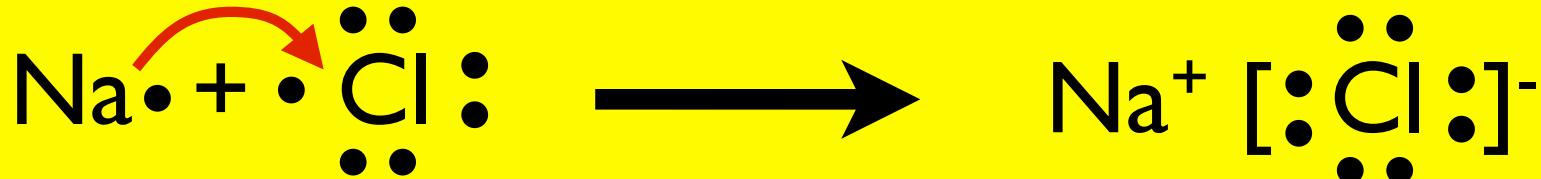
Lorsque les atomes des **métaux** des groupes principaux forment **un cation**, ils perdent les électrons de valence s et p pour atteindre la configuration électronique des gaz nobles qui les précèdent.



Lorsque les atomes des **éléments du bloc p** gagnent de électrons et forment **un anion**, ils le font jusqu'à atteindre la configuration électronique des gaz nobles qui les suivent.

Structure de Lewis: Liaison ionique

Grande différence d'électronégativité (ΔEN): passage d'un électron de l'atome le moins électronégatif au plus électronégatif



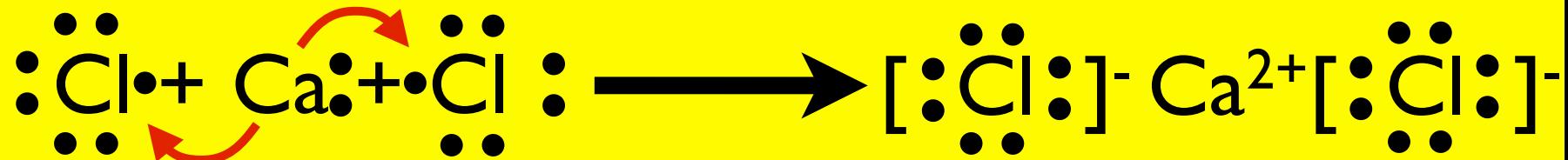
Electronégativité

Na: 0.93

Cl: 3.16

$\Delta EN = 2.23$

Na⁺ : configuration électronique de Ne
Cl⁻: configuration électronique de Ar

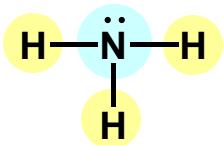


Représentation de Lewis (liaisons covalentes)

Méthodologie

1. Dénombrer les **électrons de valence** de tous les atomes de la molécule ou de l'ion.
2. Dessiner le **squelette** de la molécule en reliant les atomes les uns aux autres par une paire d'électrons; l'atome le moins électronégatif occupe la **place centrale**. (H, F sont toujours des atomes périphériques)
3. Compléter les **octets** des atomes liés à l'atome central.
4. Placer les électrons restants sur l'atome central.
5. Si les nombres d'électrons disponibles est insuffisant, introduire des **liaisons multiples** et attribuer les charges de l'ion.

Exemple



► **Atome périphérique** : lié seulement à un autre atome



► **Atome central** : lié à au moins deux autres atomes de la structure

EXEMPLE 1: le cas de la molécule d'azote N₂

1. Dénombrer les électrons de valence de tous les atomes de la molécule: 2 x 5 = 10

Électrons utilisés/ électrons disponibles

0 10

2. Dessiner le squelette de la molécule en reliant les atomes les uns aux autres;



2 8

3. Compléter les octets des atomes



14 -4

4. Si le nombre d' électrons disponibles est insuffisant, introduire des liaisons multiples.

Double liaison



12 -2

Triple liaison



10 0

Molécule très stable (inerte), symétrique, 2 doublets d'électrons libres

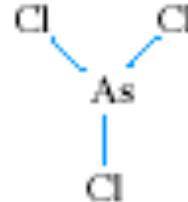
EXEMPLE 2: AsCl₃

1	2	3	4																
1	H																		
2	Li	4 Be																	
3	Na	12 Mg																	
4	K	20 Ca	21 Sc																
				22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
				Titanium titanium	Vanadium vanadium	Chromium chromium	Manganese manganèse	Iron ferro	Cobalt cobalto	Nickel nickel	Copper cuivre	Zinc zinc	Gallium gallium	Germanium germanium	Arsenic arsenic	Selenium sélénium	Bromine brome	Krypton krypton	
				Transition metals	Transition metals	Transition metals	Transition metals	Transition metals	Transition metals	Transition metals	Transition metals	Transition metals	Post-transition metals	Post-transition metals	Post-transition metals	Post-transition metals	Post-transition metals	Post-transition metals	

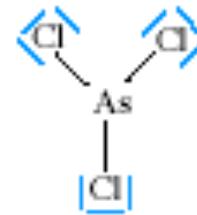
- Dénombrer les électrons de valence de tous les atomes de la molécule: $5 + (7 \times 3) = 26$

26 électrons de valence

- Dessiner le squelette de la molécule en reliant les atomes les uns aux autres;



- Compléter les octets des atomes périphériques



24 électrons utilisés
2 à placer
sur l'atome central

- Placer les électrons restants sur l'atome central



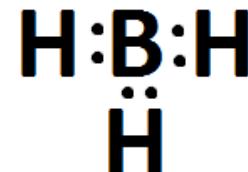
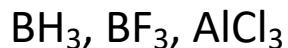
- Si le nombre d' électrons disponibles est insuffisant, introduire des liaisons multiples.
Pas nécessaire

Représentation de Lewis (limites de validité)

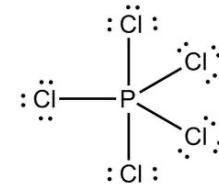
Description empirique. Couplée avec la théorie (VSEPR), elle permet une représentation géométrique de la forme de la molécule une estimation de sa polarité et de sa réactivité chimique

1. La règle de l'octet (ou doublet (H, He, Li, Be)) ne s'applique pas à tous les éléments/molécules

- Hypovalence (généralement B, Al)

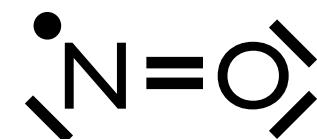


- Hypervalence: SF_6 , PCl_5 et métaux de transition (utilisation des orbitales d)

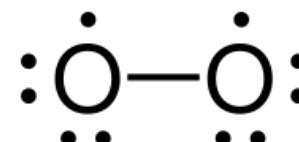
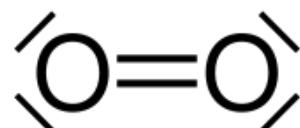


- Les molécules comportant un nombre impair d'électrons de valence (impossible d'avoir un octet complet pour chaque atome)

Les radicaux comme NO (11 électrons de valence)



2. Certaines propriétés comme le paramagnétisme doivent être décrites à partir d'une représentation plus précise des électrons dans les couches de valence (notion du spin)



O_2 est un biradical

Question

Quelle molécule de la liste suivante respecte la règle de l'octet

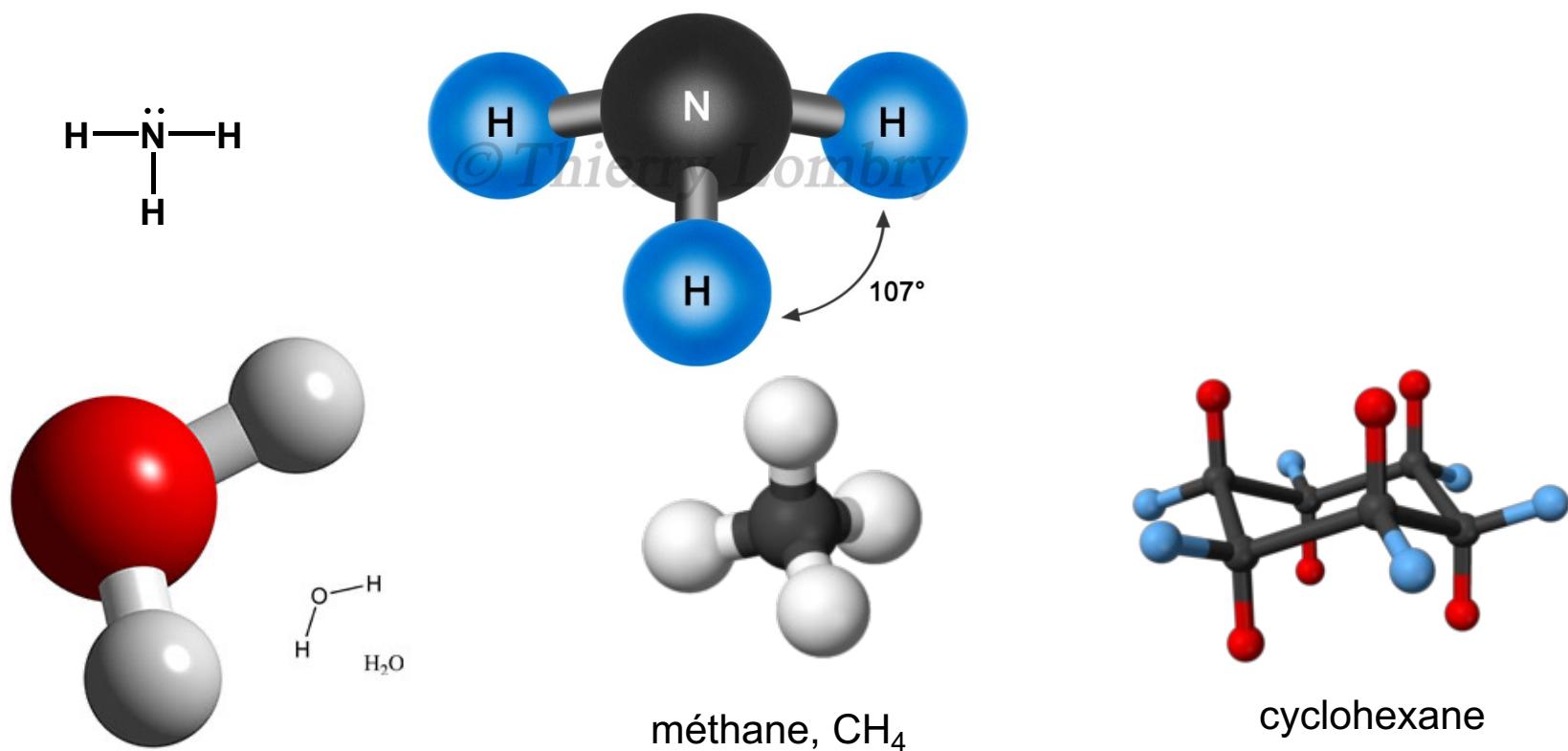
1. AsCl_3
2. AsCl_5
3. SF_4
4. SF_6

Informations importantes données par la structure de Lewis pour déterminer la géométrie moléculaire

1. Identification de paires d'électrons libres
2. Identification de liaisons multiples

Structures de Lewis et géométries moléculaires

Minimisation de l'énergie de répulsion électronique des électrons de valence

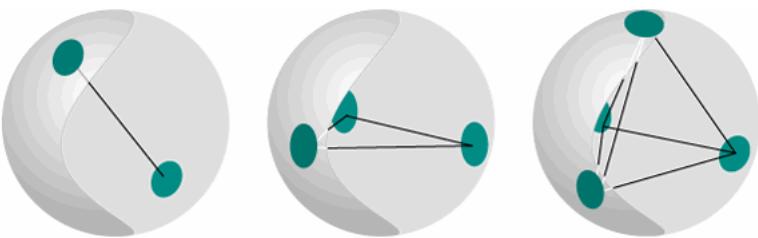


Structure des molécules

→ L'arrangement des électrons sur les atomes contrôle la structure tridimensionnelle des molécules.

Le modèle RPEV (le modèle de la Répulsion des Paires d'Electrons de Valence) ou VSEPR (Valence-Shell Electron-Pair Repulsion)

Lorsque l'on considère un atome, les paires d'électrons liantes et non liantes se placent de telle sorte à **minimiser leur énergie de répulsion**. La forme de la molécule est donc déterminée par la position des atomes liés à l'atome central considéré.



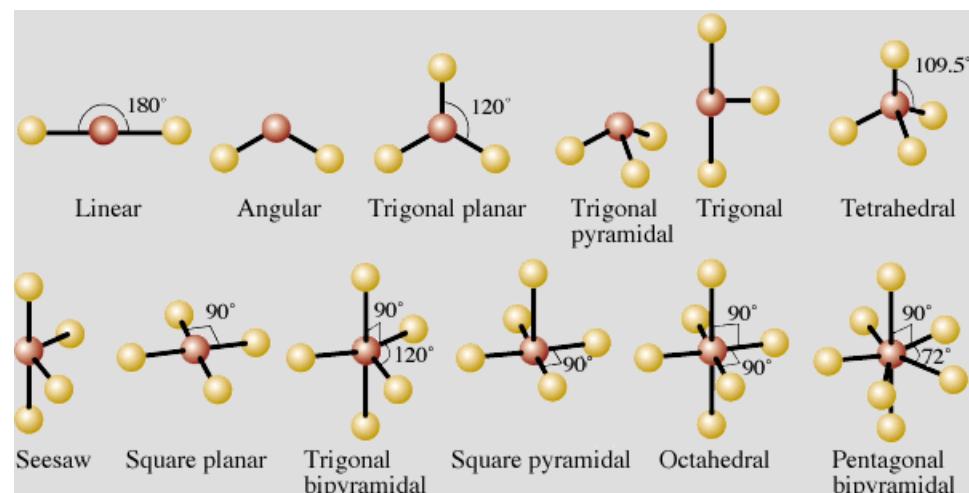
En vert : régions occupées par les fortes concentrations en électrons autour d'un atome central.

AX_nE_m

A : atome central

n : nombre d'atomes liés à l'atome central

m : nombre de doublets libres de l'atome central



Géométrie de molécules simples

Géométrie de molécules-1

- Molécule du type AX_2 : L'énergie de répulsion est minimale entre deux paires électroniques lorsqu'elles se situent à 180° . La géométrie de l'ensemble est linéaire.

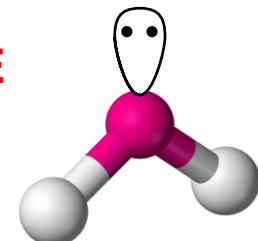


Linéaire ($\alpha=180^\circ$)
Hybridation sp (BiF_2)

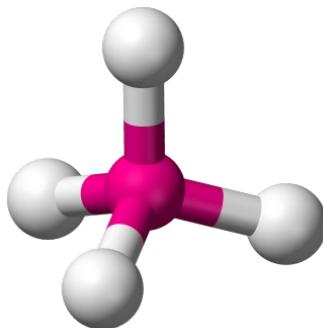
- Molécule du type AX_3 : L'énergie de répulsion est minimale entre trois paires électroniques lorsqu'elles se situent à 120° dans un même plan. La géométrie de l'ensemble est une triangulaire.



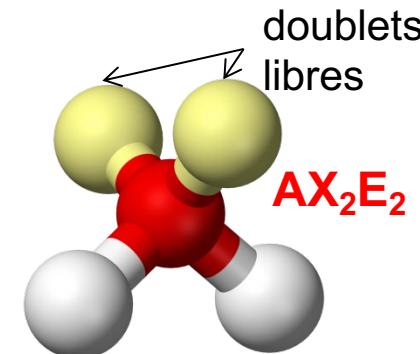
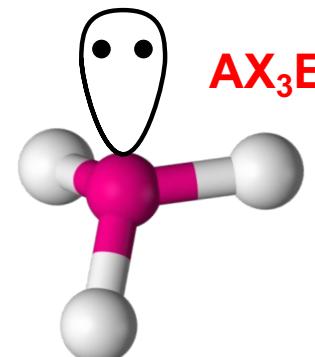
Plane triangulaire ($\alpha=120^\circ$)
Hybridation sp^2 (BF_3)



- Molécule du type AX_4 : La géométrie de l'ensemble de quatre paires électroniques de liaison est le tétraèdre régulier , la molécule est tétraédrique avec l'angle théorique de $109^\circ 28$.



Tétraédrique ($\alpha=109^\circ 28$)
Hybridation sp^3 (CH_4)



doublets
libres

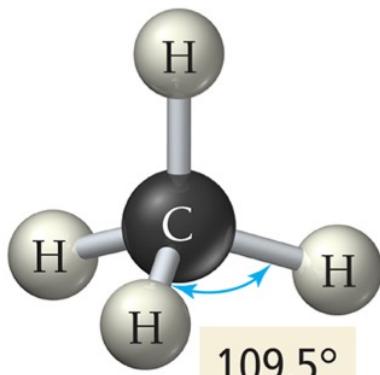


Molécules de type AX_nE_m ($n+m = 4$)

Les paires d'électrons non liants participent aussi à la **description électronique** (géométrie de répulsion) d'une molécule, mais sont ignorées lorsque l'on décrit sa forme.

AX_4

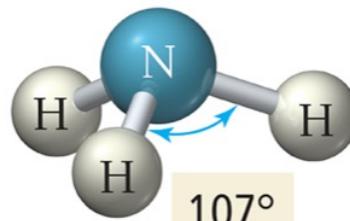
No lone pairs



CH_4

AX_3E

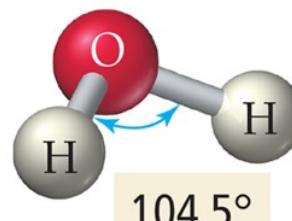
One lone pair



NH_3

AX_2E_2

Two lone pairs

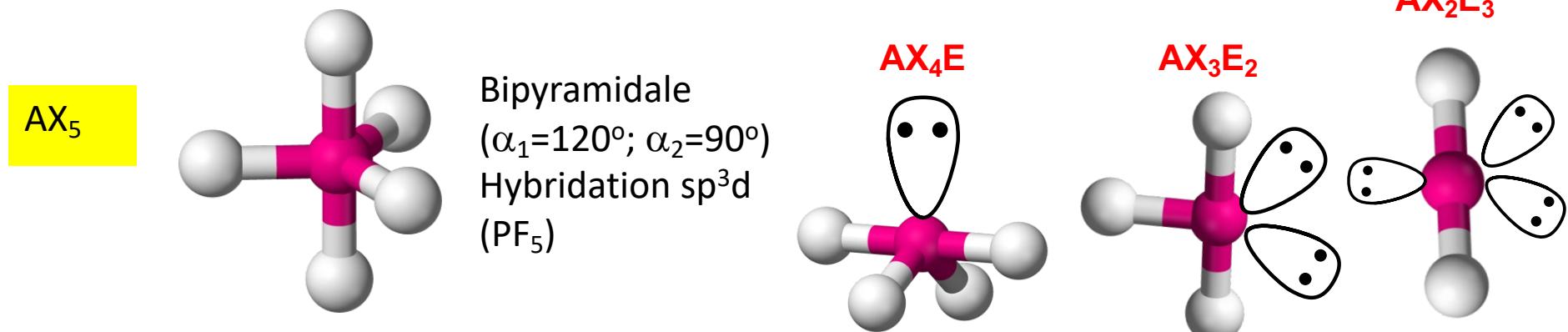


H_2O

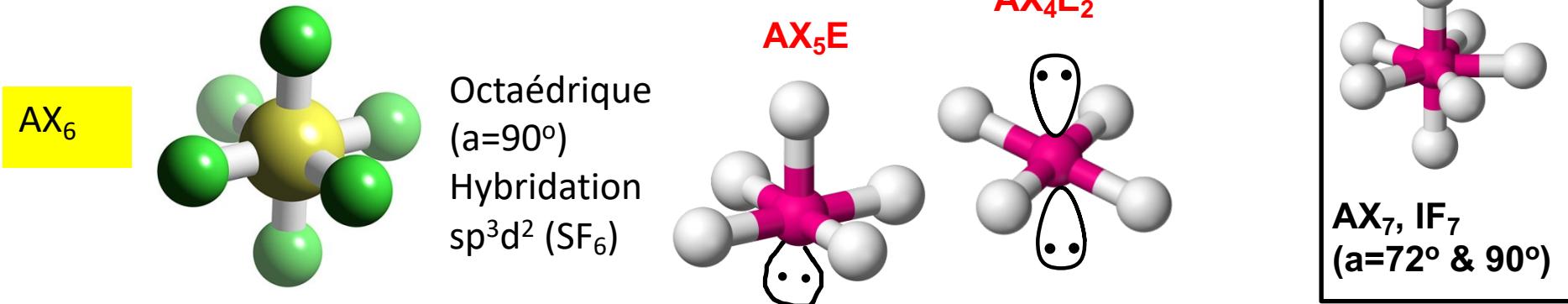
Les doublets non-liants sont moins localisés dans l'espace que les doublets liants et exercent une répulsion plus forte (angles dans la molécule plus petits)

Géométrie de molécules-2

- Molécule du type AX_5 : La géométrie de l'ensemble est une bipyramide à base triangle équilatéral avec deux types d'angle : 120° et 90° . Les cinq directions ne jouant pas le même rôle, on distingue les positions axiales des positions équatoriales.



- Molécule du type AX_6 : La géométrie de l'ensemble est celle d'un octaèdre régulier les directions font entre elles des angles de 90° .



Structures du type AX_n et AX_nE_m

(X : doublets liants ; E : doublets libres)

AX_2	$X—A—X$ linéaire	AX_3E	AX_4E	AX_6
AX_3	$X—A—X$ triangulaire plane	AX_2E_2	AX_3E_2	AX_5E
AX_2E	$X—A—X$ angulaire	AX_5	AX_2E_3	AX_4E_2
AX_4	X tétraédrique	$bipyramide à base triangulaire$	$linéaire$	$pyramide à base carrée$

Tableau récapitulatif_1

VSEPR code	Figure de répulsion	Géométrie moléculaire	Exemple
AX_1	linéaire	linéaire	HF
AX_2	linéaire	linéaire	BeCl_2
AX_3	triangulaire (plane)	triangulaire (plane)	BH_3
AX_2E_1	Triangulaire (plane)	coudée	O_3
AX_4	tétraèdre	tétraèdre	CH_4
AX_3E_1	tétraèdre	Pyramide à base triangulaire	NH_3
AX_2E_2	tétraèdre	coudée	H_2O

Tableau récapitulatif_2

VSEPR code	Figure de répulsion	Géométrie moléculaire	Exemple
AX_5	Bipyramide à base triangulaire	Bipyramide à base triangulaire	PCl_5
$\text{AX}_4\text{E}1$	Bipyramide à base triangulaire	à bascule	SF_4
$\text{AX}_3\text{E}2$	Bipyramide à base triangulaire	En forme de T	BrF_3
AX_2E_3	Bipyramide à base triangulaire	linéaire	XeF_2
AX_6	octaèdre	octaèdre	SF_6
AX_5E_1	octaèdre	Pyramide à base carrée	BrF_5
AX_4E_2	octaèdre	(plane) carrée	XeF_4

Le moment dipolaire



$$\text{moment dipolaire: } \mu = \delta \cdot l$$

δ : charge électrique partielle résultant de la polarisation

l : longueur de la liaison

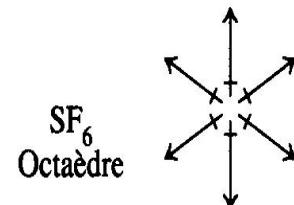
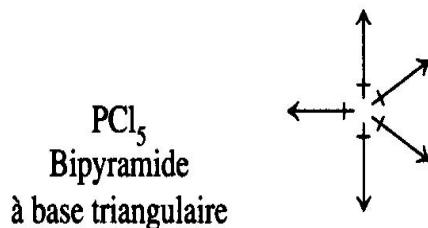
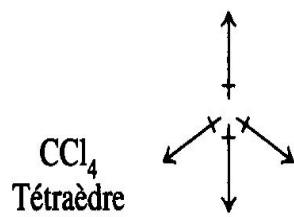
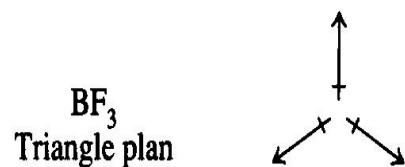
Pour HCl $\mu=1,02$ D

1 D (Debye) = $3,36 \times 10^{-30}$ C · m

La polarité des molécules

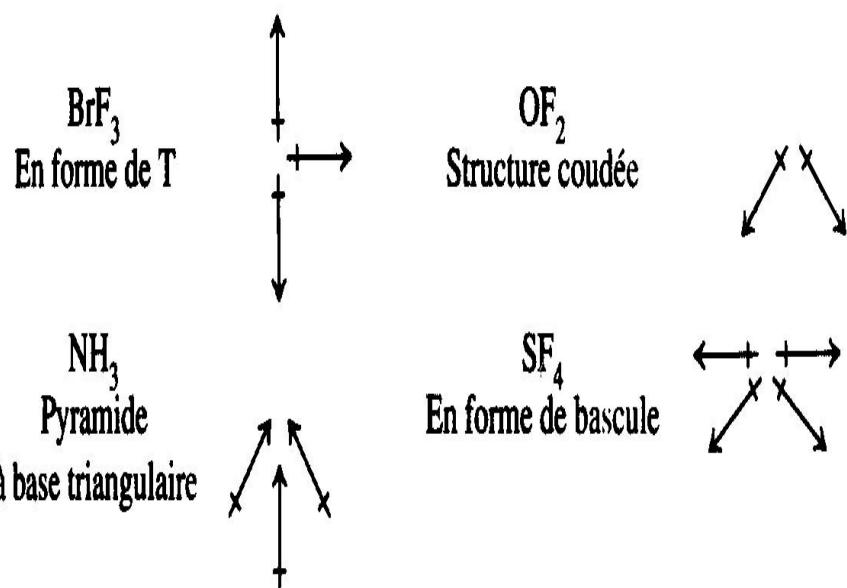
Non-polarité des molécules symétriques

Même si les liaisons individuelles sont polaires: la somme vectorielle des moments dipolaires individuels est nulle.



Polarité des molécules asymétriques

Une géométrie asymétrique conduit (si les liaisons individuelles sont polaires) à une molécule polaire



Question

Soit la molécule ClF_3

Déterminer la figure de répulsion et la géométrie moléculaire

- 1) Tétraèdre tétraèdre
- 2) Tétraèdre triangulaire
- 3) triangulaire triangulaire
- 4) Bipyramide à base triangulaire forme T

question?

Comment expliquer la géométrie des liaisons chimiques, observées expérimentalement, et souvent prédites par le modèle de la répulsion des électrons de valence, à partir des orbitales atomiques

Théorie: L'hybridation des orbitales atomiques

Les orbitales moléculaires sont des mélanges (combinaisons linéaires) d'orbitales atomiques (s,p,d)

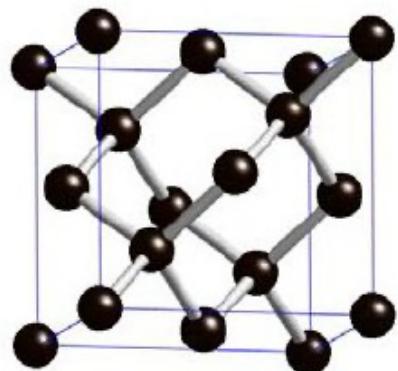
Pas de preuve expérimentale,
mais explique une grande partie de la chimie
Nous allons utiliser le carbone comme exemple

Liaisons entre atomes de carbone

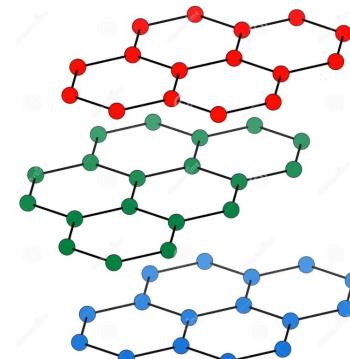
diamant



graphite



Hybridation sp^3



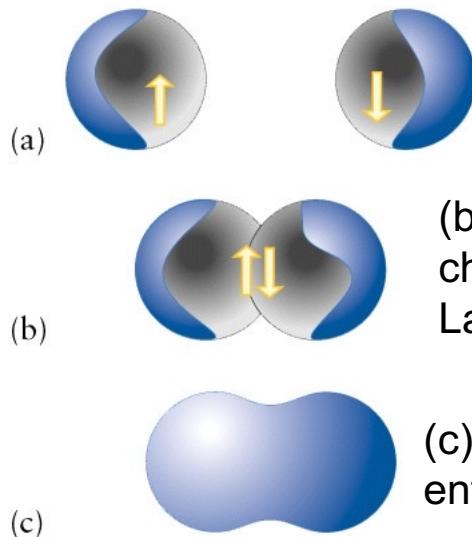
Hybridation sp^2

Recouvrement des orbitales

Comment expliquer la formation de liaisons au niveau des orbitales?

Théorie de la liaison de valence: une liaison covalente résulte de la formation d'un doublet d'électrons de spins opposés dans la région du recouvrement de deux orbitales atomiques

Formation d'une molécule de H₂



(a) Deux atomes d'hydrogène se rapprochent l'un de l'autre. Ils renferment chacun un électron dans l'orbitale 1s

(b) A une certaine distance, les orbitales commencent à se chevaucher : **recouvrement des orbitales** 1s.
La région du recouvrement contient alors 2 électrons de spins opposés.

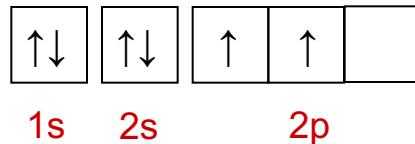
(c) Augmentation de la densité électronique dans la région située entre les 2 noyaux : maintient ensemble les 2 noyaux.

LES ELECTRONS CELIBATAIRES DES ATOMES PERMETTENT LA FORMATION DE LIAISONS CHIMIQUES

Hybridation

Ex : Le cas du méthane, CH₄

Configuration de C à l'état fondamental :



L'orbitale 2p contient 2 électrons non appariés ▶ on prédit que la molécule d'hydrocarbure la plus simple est CH₂. Selon les données expérimentales, CH₂ n'est pas stable.
L'hydrocarbure stable le plus simple est **CH₄**.

Expérimentalement ▶ CH₄ est de géométrie tetraédrique

Donc : **4 liaisons C-H identiques** pointant vers les coins du tétraèdre

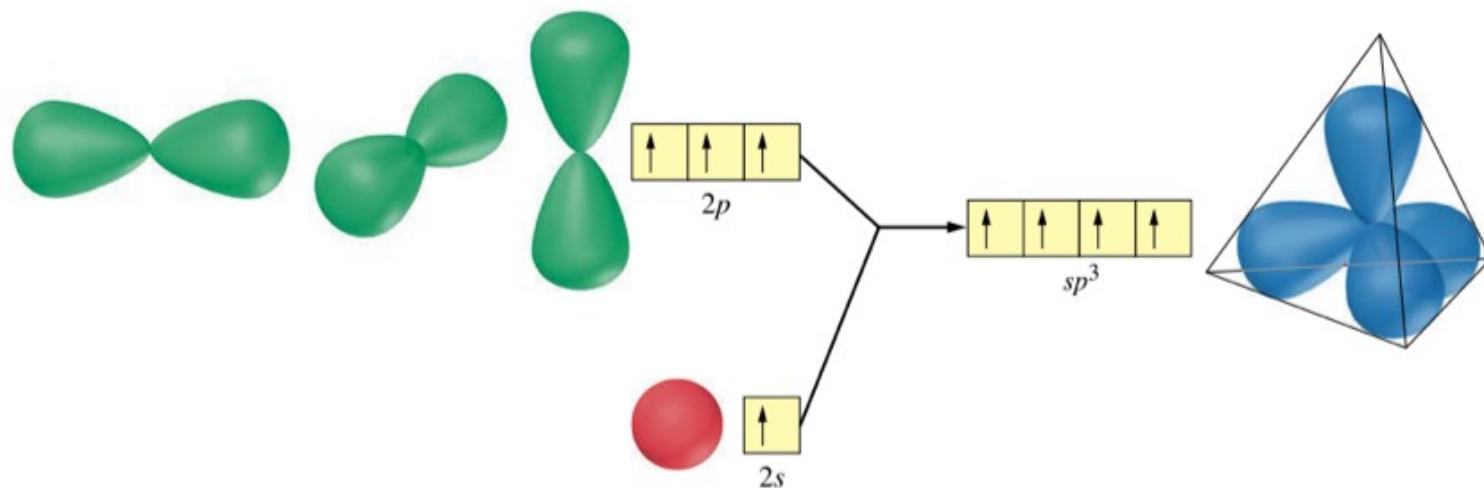
(1) ▶ Il faut donc trouver un état excité du carbone avec 4 électrons non appariés

Promotion d'électrons dans des orbitales d'énergie supérieure

(2) ▶ Il faut que les quatre orbitales de l'atome de C qui vont se recouvrir avec l'orbitale 1s des atomes d'hydrogène soient identiques.

Hybridation des orbitales 2s et 2p ▶ 4 orbitales équivalentes quant à la forme et l'énergie

Hybridation sp^3



4 orbitales atomiques
1 x s; 3 x p

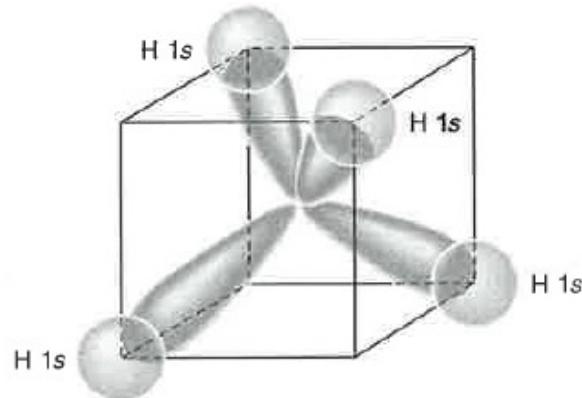
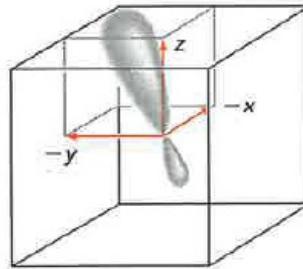
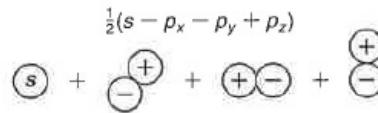
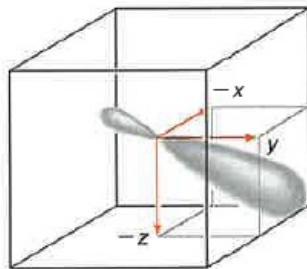
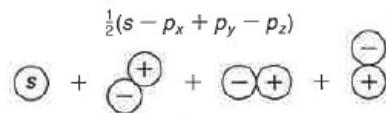
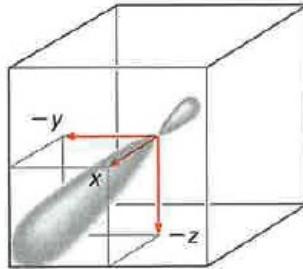
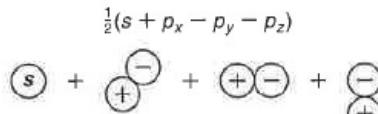
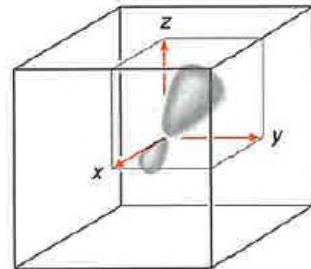
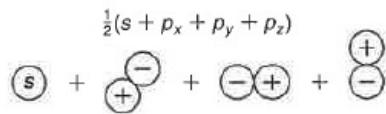


4 orbitales hybridées
4 x sp^3

Source: Chimie générale (ERPI)

Hybridation sp³- CH₄

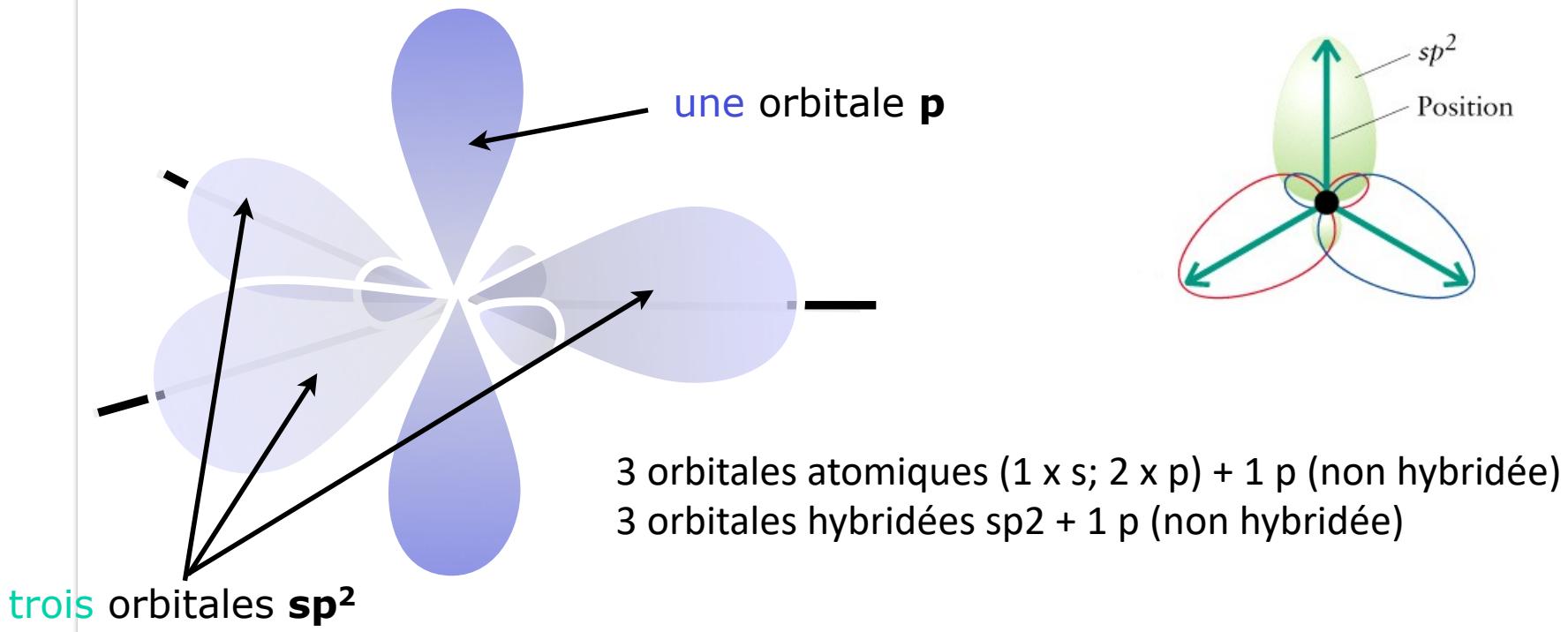
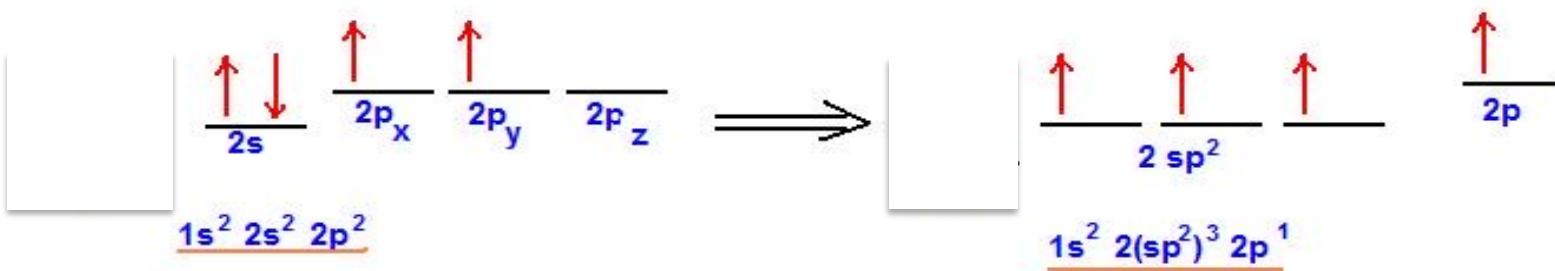
Annexe



Remarques:

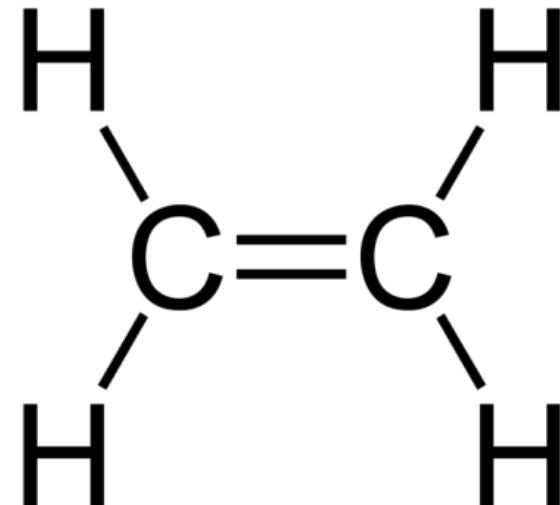
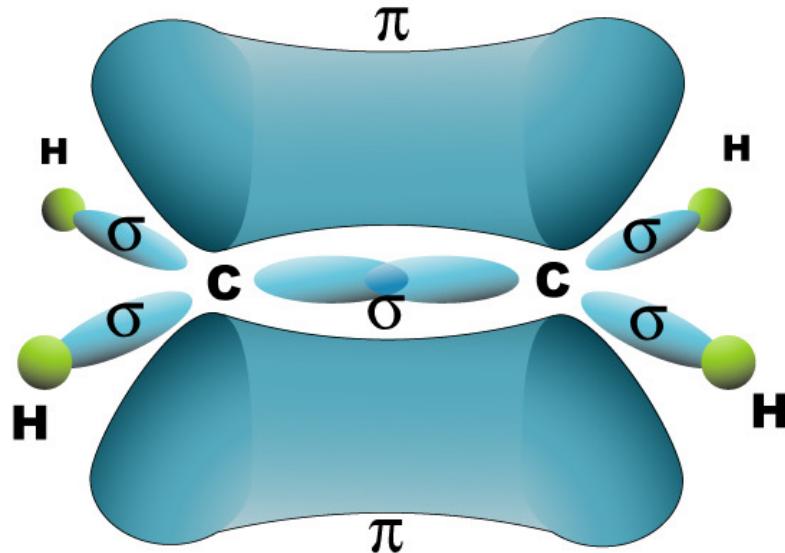
1. dans des cas moins symétriques, les coefficients des orbitales s,p, peuvent être différents
2. Le facteur de normalisation (ici $\frac{1}{2}$) est un paramètre d'ajustement permettant d'obtenir une probabilité de 1 de trouver l'électron dans l'espace complet.

L'hybridation sp^2 du carbone

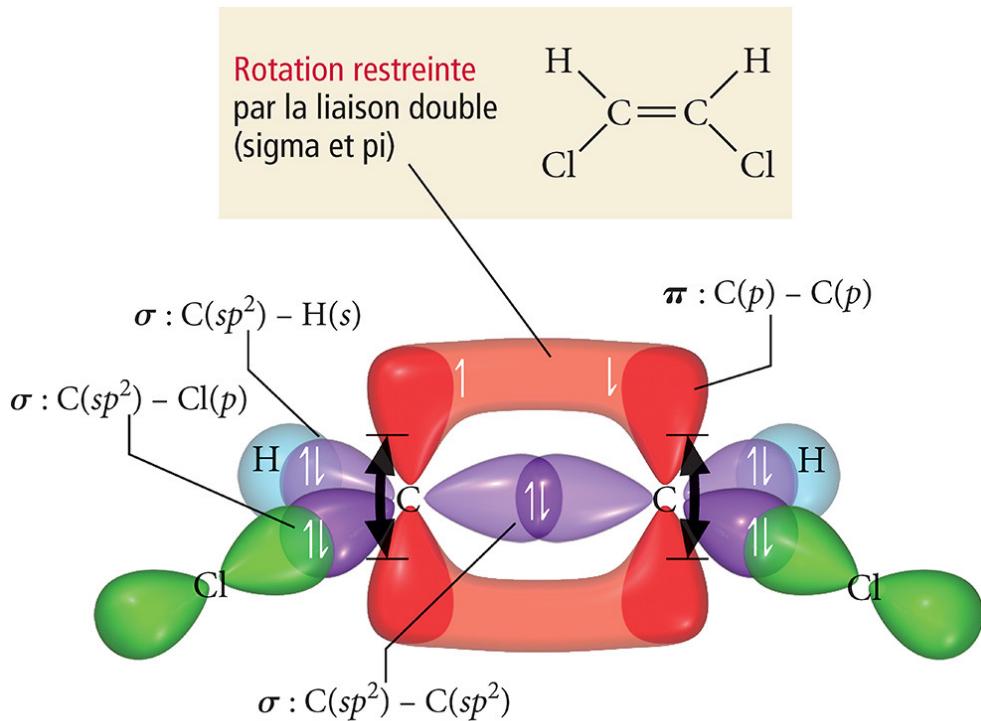


La double liaison du carbone

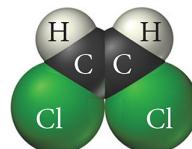
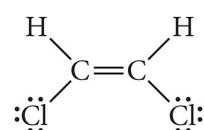
L'éthylène



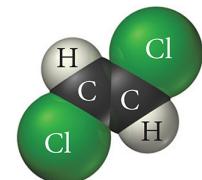
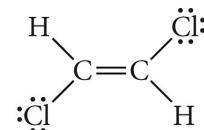
- Hybridation du carbone : sp^2
- Chaque atome de carbone forme 4 liaisons : 3 σ (avec orbitales sp^2) et 1 π (avec orbitale p)
- Les 4 liaisons C-H et la liaison C-C sont dans le même plan (géométrie plane)
- la liaison π supprime la rotation (molécule rigide)



©ERPI, tous droits réservés.



cis-1,2-dichloroéthène



trans-1,2-dichloroéthène

©ERPI, tous droits réservés.

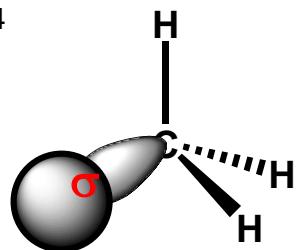
À cause de la rotation restreinte, les deux composés ci-dessus peuvent être isolés. Ils ont des propriétés physicochimiques différentes.

Liaison σ / liaison π

Liaison σ

- symétrie cylindrique autour de l'axe de liaison
- Liaison formée par recouvrement axial
- Liaison très stable
- Les deux atomes liés peuvent tourner autour de l'axe de la liaison-

Ex : CH_4



4 liaisons σ formées par recouvrement d'une orbitale 1s de l'hydrogène et d'une orbitale sp^3 du carbone.

C-C: 344 kJ/mol

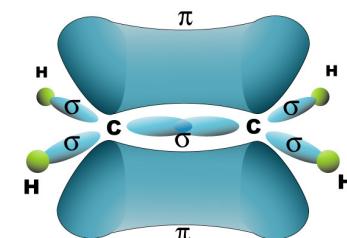
C=C: 614 kJ/mol

C≡C: 812 kJ/mol

Liaison π

- Liaison plus faible que la liaison σ
- Axe de liaison dans un plan nodal
- Les deux atomes liés ne peuvent pas tourner autour de l'axe de la liaison

Ex : $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$



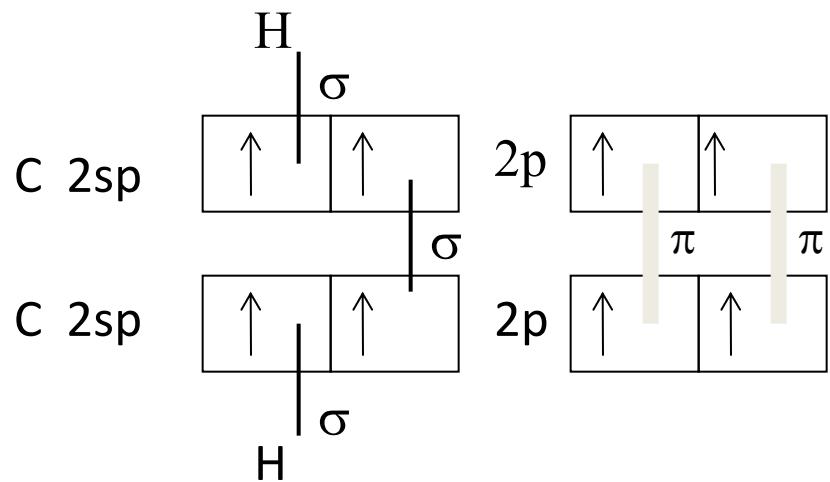
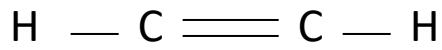
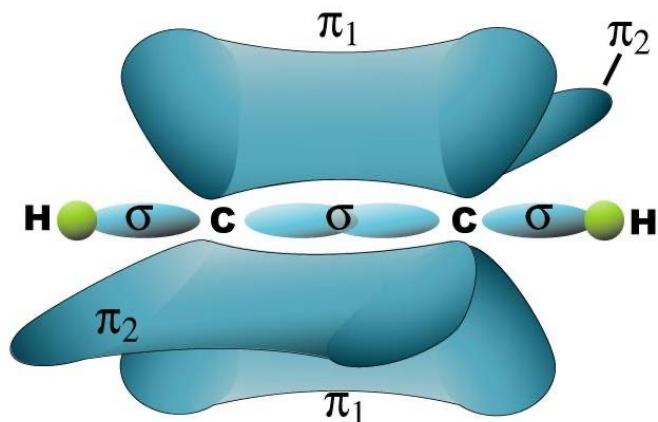
Données expérimentales :

- 6 atomes dans un même plan
- H-C-H = 120° , C-C-H = 120°

donc on doit utiliser une hybridation sp^2 .

- 2C : liaison σ par recouvrement d'une orbitale hybride sp^2 sur chaque atome
- Les atomes d'H forment des liaisons σ avec les lobes restants des hybrides sp^2
- Les orbitales 2p non hybridées sont dans un plan perpendiculaire et se recouvrent pour former une liaison π .

L'hybridation sp et la triple liaison du carbone



- Hybridation du carbone : sp
- 2 orbitales sp par atome de carbone; 1 liaison (σ) C-H + 1 liaison (σ) C-C
- 2 orbitales p non hybridées , 2 liaisons π
- Molécule linéaire
- Les 2 liaisons π suppriment la rotation (molécule rigide)

Hybridation des atomes dans une molécule complexe

1. le nombre d'orbitales hybrides d'un atome donné est la somme des atomes liés et des doublets non liants d'électrons
2. Les atomes terminaux liés par une seule liaison ne sont pas hybridés

nombre d'atomes liés + paire d'électrons libres	Hybridation
2	sp
3	sp^2
4	sp^3
5	sp^3d
6	sp^3d^2

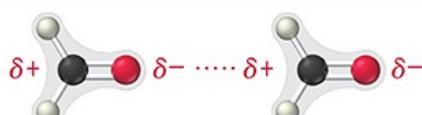
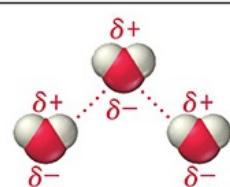
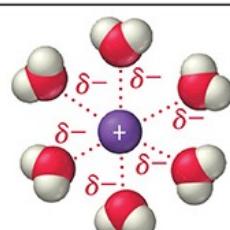
Les liaisons intermoléculaires sont individuellement faibles mais collectivement importantes:

Analogie: velcro



Classification des liaisons intermoléculaires

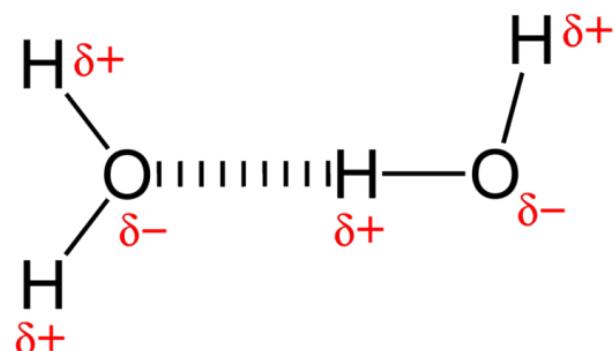
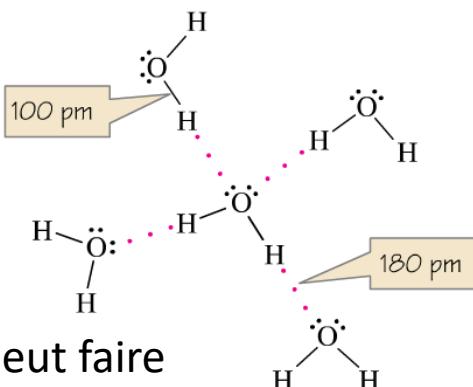
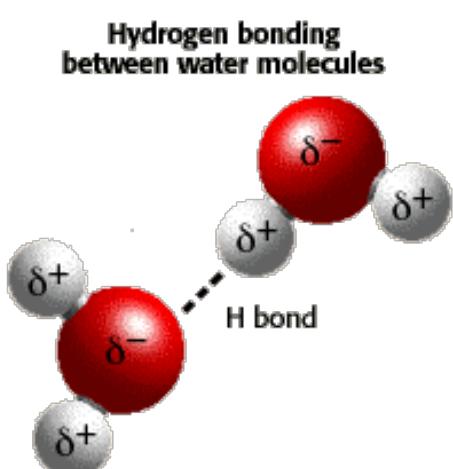
Tableau 6.4 Types de forces intermoléculaires

Type	Présent dans	Perspective moléculaire	Intensité de la force intermoléculaire
Dispersion	Tous les atomes et molécules		Dipôles induits Dispersion, London
Dipôle-dipôle	Molécules polaires		Dipôles permanents
Liaison hydrogène	Molécules comportant H lié à F, à O ou à N et des O, F ou N ayant des doublets d'électrons disponibles		4-40 kJ/mol
Ion-dipôle	Mélanges de composés ioniques et composés polaires		5-60 kJ/mol

La liaison hydrogène

Une liaison hydrogène est formée par un atome d'hydrogène placé entre deux atomes très électronégatifs. Seuls les atomes F, O et N sont suffisamment électronégatifs pour qu'une telle liaison se forme.

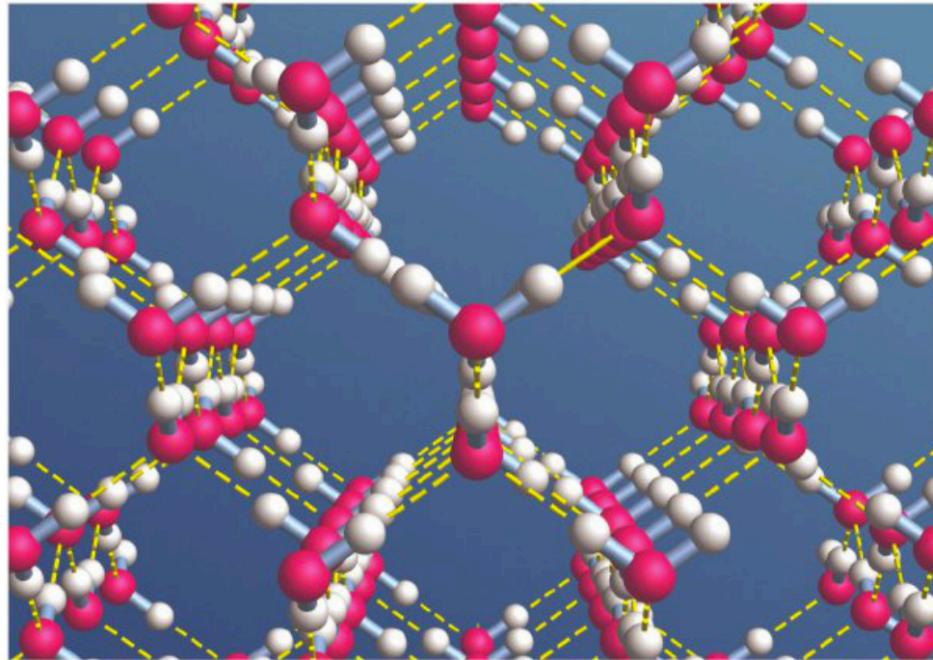
- L'atome d'hydrogène (1 seul électron) est lié avec un atome très électronégatif (charges partielles considérables)
- Un atome avec au moins une paire d'électrons se lie à l'atome d'hydrogène
- Les atomes sont assez petits et peuvent être très proches



Chaque molécule d'eau peut faire quatre ponts hydrogène.

Réseau tridimensionnel

Les propriétés spéciales de l'eau s'expliquent en grande partie par les forces intermoléculaires (ponts hydrogène)



1. Point d'ébullition élevé
2. Densité plus élevée dans la phase liquide que dans la phase solide

La structure de la glace est rigide et ouverte. Si la glace fond, des molécules d'eau liquide peuvent pénétrer dans la structure et la densifier