

Physique

Chapitre 6
Forces à l'échelle microscopique

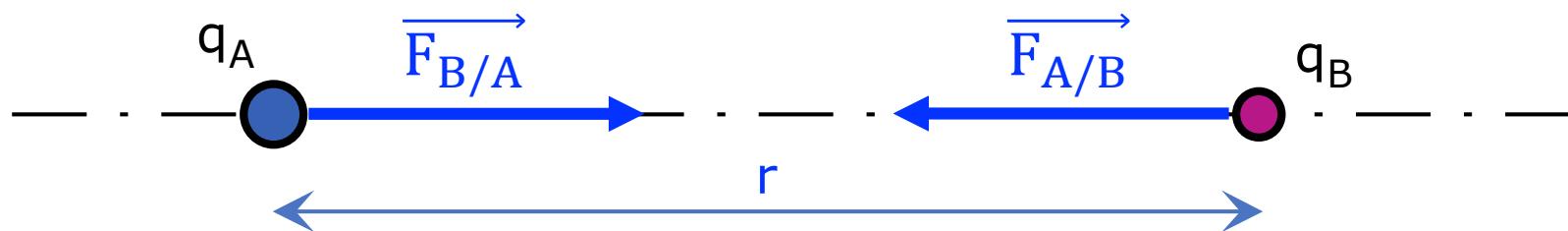
Dr. Benoît CHABAUD

Objectifs

- Dans ce Chapitre, nous allons présenter :
 - La force de Coulomb,
 - La notion de champ électrique, et
 - Le moment dipolaire.
- Ces grandeurs nous permettront d'introduire les :
 - Forces dérivées de l'électrostatique, et
 - Le potentiel de Lennard-Jones.

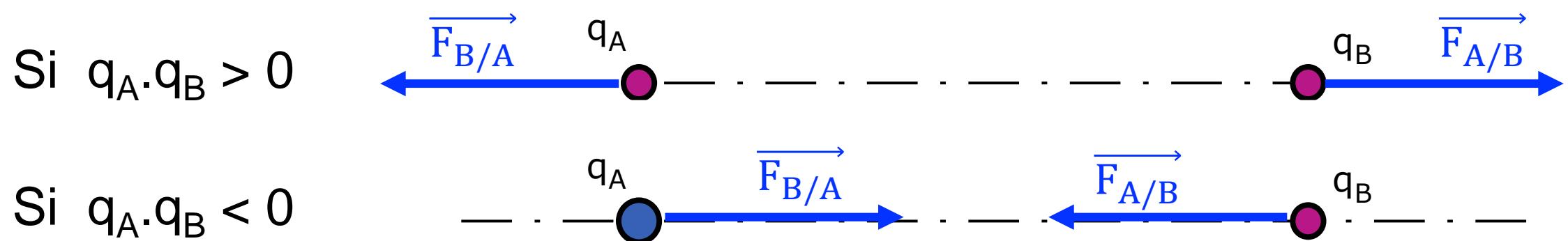
1.1. Force de Coulomb

- Définition : la force de Coulomb est une force à distance, qui intervient entre des particules chargées.
- Considérons deux particules A et B, de charges q_A et q_B , situés à une distance r :



- La force de Coulomb $\overrightarrow{F_{B/A}}$ est la force que la charge q_B exerce sur la charge q_A (et inversement pour $\overrightarrow{F_{A/B}}$).
- Cette force dépend :
 - des charges q_A et q_B
 - et de leur distance r .

- Cette force est **répulsive** si les charges q_A et q_B sont de même signe, et **attractive** si les charges q_A et q_B sont de signe opposé :



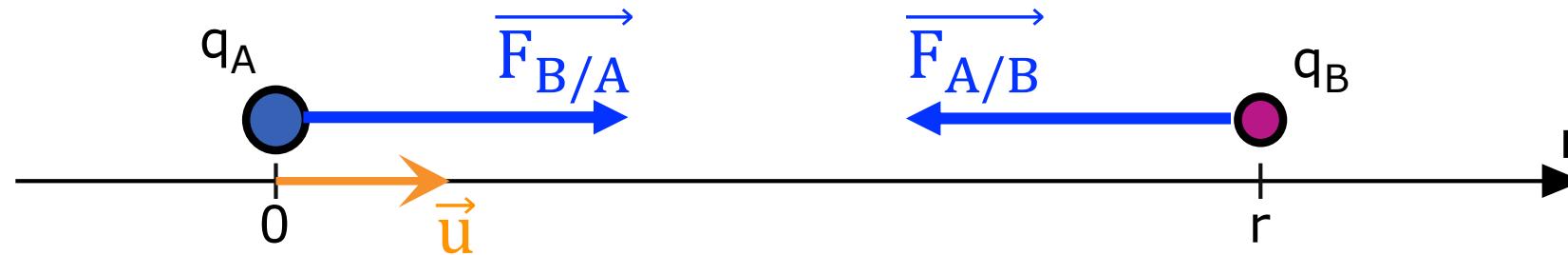
- La force de Coulomb est orientée suivant l'axe qui relie q_A à q_B et son module s'écrit :

$$\|\vec{F}\| = k \frac{|q_A q_B|}{r^2}$$

[!]

- où k est la **constante de Coulomb** qui vaut : $k = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ (on pourra vérifier que l'expression de $\|\vec{F}\|$ est homogène).

- **Expression vectorielle**
- On peut écrire les forces à l'aide d'un vecteur unitaire \vec{u} (orienté par exemple de q_A vers q_B) :



- Si $q_A \cdot q_B < 0$, les forces sont attractives et s'écrivent :

✓ Force que la charge q_B exerce sur la charge q_A :

$$\overrightarrow{F_{B/A}} = k \frac{q_A q_B}{r^2} (-\vec{u}) = k \frac{|q_A q_B|}{r^2} \vec{u}$$

✓ Force que la charge q_A exerce sur la charge q_B :

$$\overrightarrow{F_{A/B}} = k \frac{q_A q_B}{r^2} \vec{u} = k \frac{|q_A q_B|}{r^2} (-\vec{u})$$

- On voit que les 2 forces sont opposées : $\overrightarrow{F_{A/B}} + \overrightarrow{F_{B/A}} = \vec{0}$

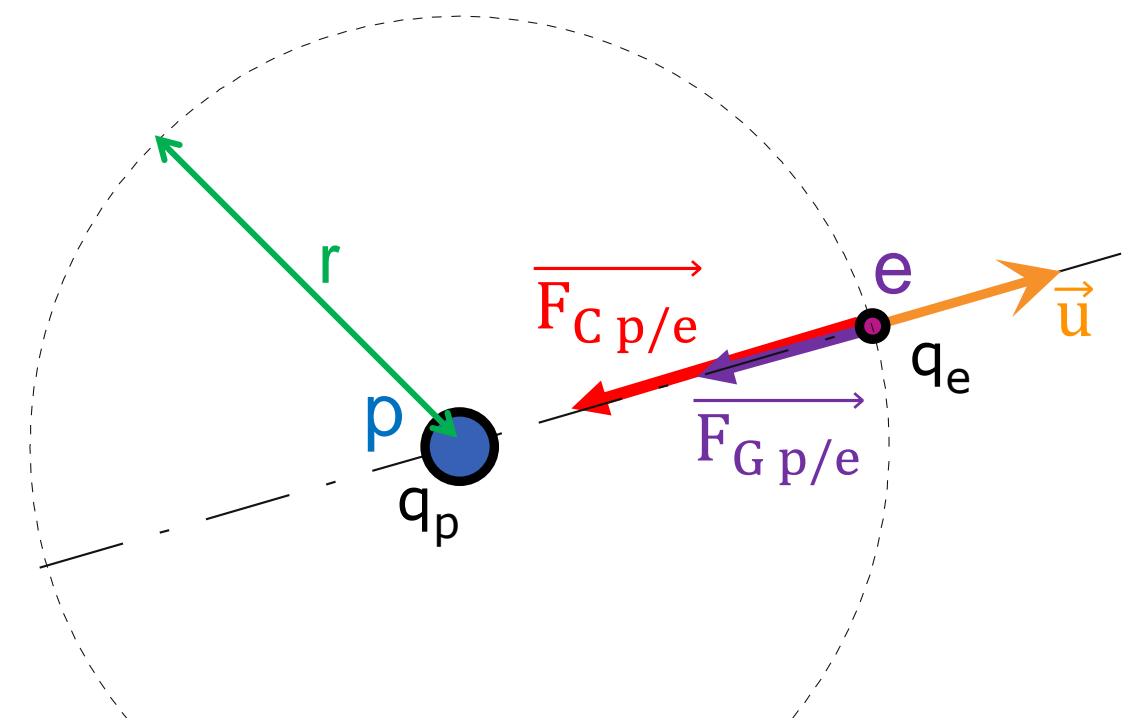
- Domaine d'application
- On peut comparer la force de Coulomb à la force d'attraction gravitationnelle entre deux particules (à une échelle microscopique).
- Considérons par exemple l'atome d'Hydrogène, dans lequel le proton **p** exerce **deux forces (attractives)** sur l'électron **e** :

- La force gravitationnelle s'écrit :

$$\overrightarrow{F_{G p/e}} = G \frac{m_p m_e}{r^2} (-\vec{u})$$

- La force de Coulomb s'écrit :

$$\overrightarrow{F_{C p/e}} = k \frac{q_p q_e}{r^2} (\vec{u}) = k \frac{|q_p q_e|}{r^2} (-\vec{u})$$



- A.N. : Avec les masses et les charges du proton et de l'électron, et avec : $r \approx 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ (rayon de l'atome d'Hydrogène), on obtient :

$$\checkmark \quad \|\overrightarrow{F_{G p/e}}\| = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \times 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}{(0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m})^2} \\ = 3,6 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

$$\checkmark \quad \|\overrightarrow{F_{C p/e}}\| = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \times \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \times |-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}|}{(0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m})^2} \\ = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

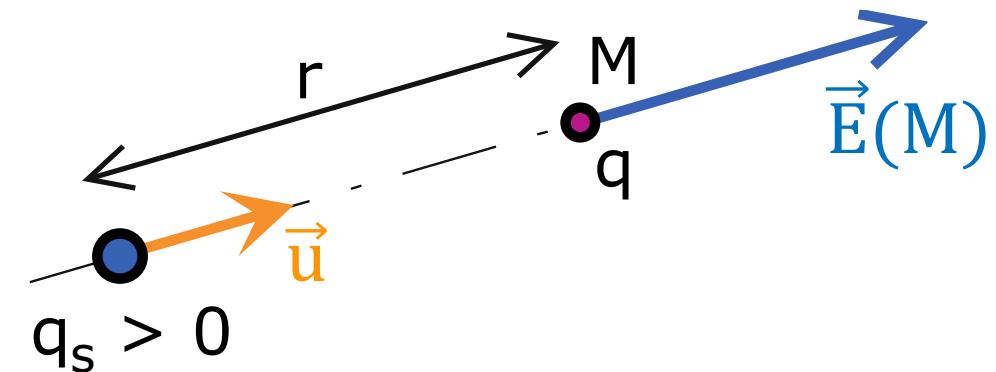
- Dans l'atome d'Hydrogène, la force de Coulomb est environ 10^{39} fois plus intense que la force de gravitation !
- On retiendra qu'aux échelles atomiques (et moléculaires), les forces gravitationnelles sont complètement négligeables devant les forces électriques.

1.2. Champ électrique

- On peut réécrire et réinterpréter la force de Coulomb sous la forme :

$$\vec{F}_q = q \left[\frac{kq_s}{r^2} \vec{u} \right]$$

→ placée en un point M situé à la distance r de q_s , la charge q subit une force due au champ électrique $\vec{E}(M)$ créé par la source q_s .



- Ce champ s'écrit :

$$\vec{E}(M) = k \frac{q_s}{r^2} \vec{u}$$

[!]

- où \vec{u} est un vecteur unitaire orienté de q_s vers le point M.

- En généralisant le schéma précédent, on peut représenter le champ électrique complet créé par une charge q_s .
- Si la charge est positive, ce champ est centrifuge :

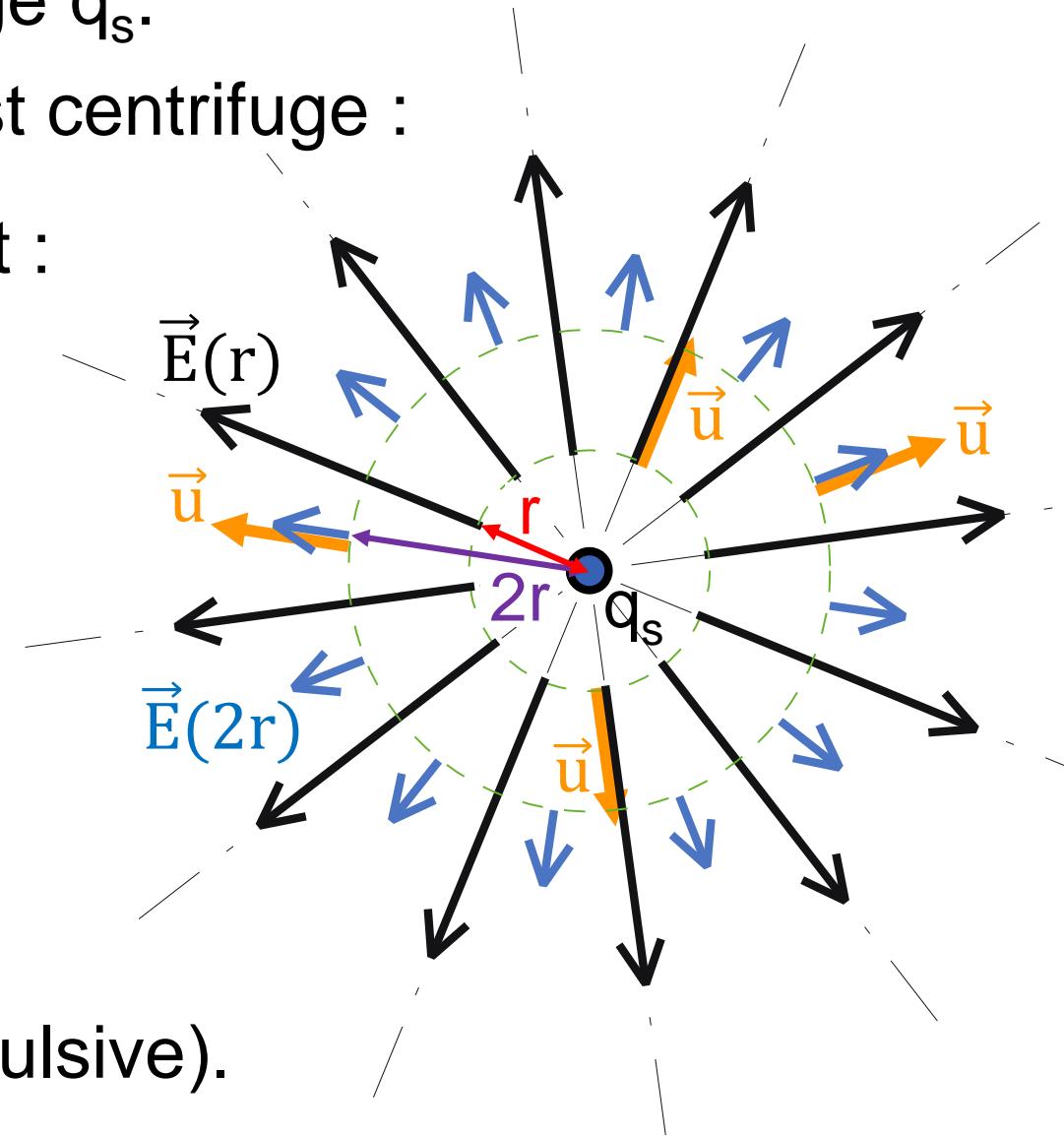
- Le module du champ électrique s'écrit :

$$\|\vec{E}\| = k \frac{|q_s|}{r^2} : \text{il décroît en } 1/r^2.$$

- Placée dans ce champ radial, une charge q subit une force :

$$\vec{F}_q = q \left[\frac{kq_s}{r^2} \vec{u} \right] = q \vec{E}(M)$$

- (si la charge q est elle aussi positive, la force est centrifuge, c'est à dire répulsive).



- Si on a plusieurs charges q_{si} en présence, le champ électrique total \vec{E} est la **somme** des champs créés par les différentes charges ‘sources’ :

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_{q_{si}}$$

- Et en généralisant l’expression de la force de Coulomb, on peut écrire :

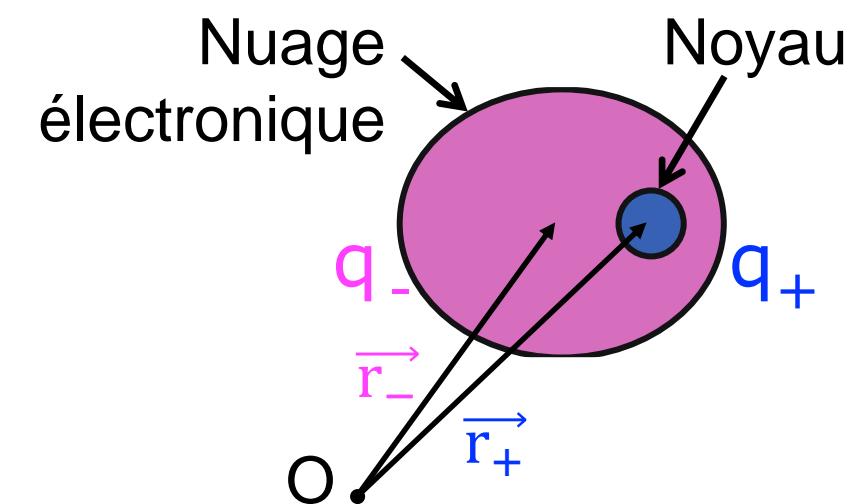
$$\boxed{\vec{F} = q \vec{E}} \quad [!]$$

- Cette relation est très générale : une **charge** q placée dans un **champ électrique** \vec{E} quelconque subit une force \vec{F} proportionnelle au produit de sa charge q par le champ \vec{E} .
- À partir de cette relation, on voit que le module du champ électrique \vec{E} s’exprime en **Newton/Coulomb**.

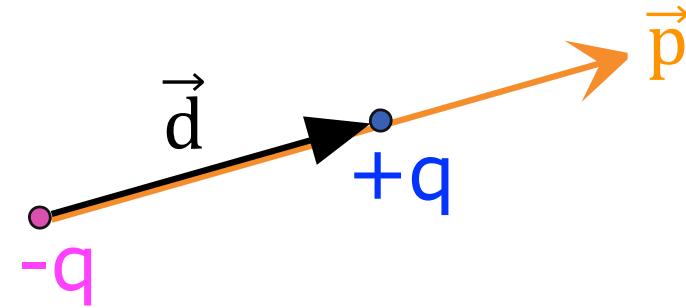
- Remarque 1
 - La relation $\vec{F} = q \vec{E}$ présente des analogies avec la relation $\vec{P} = m \vec{g}$ pour la force de pesanteur.
 - Comme pour le couple **force de pesanteur - énergie potentielle gravitationnelle**, il existe une **énergie potentielle électrique** (dont on ne parlera pas dans ce cours).
-
- Remarque 2
 - La force de Coulomb assure la cohésion des atomes (liaisons noyaux - électrons : $p \Leftrightarrow e$).
 - Cependant, entre des atomes (neutres) cette force ne permet pas d'expliquer la **cohésion** des molécules ou de la matière.
 - Pour expliquer cette cohésion, il faut introduire la notion de **moment dipolaire**.

1.3. Moment dipolaire

- Les atomes et les molécules sont globalement neutres mais les centres de masse (= barycentres) des charges **négatives** et **positives** ne se superposent pas toujours.
- Lorsque c'est le cas, la particule possède un **moment dipolaire** \vec{p} : c'est une grandeur vectorielle définie par :
$$\vec{p} = \sum_i q_i \vec{r}_i$$
- où la somme s'étend à toutes les charges q_i dans la particule.
- et où \vec{r}_i est le vecteur position de la charge q_i .
- Un tel système est appelé **dipôle**.



- Pour un dipôle constituée de 2 charges de signe opposé ($+q$ et $-q$), on peut montrer que le moment dipolaire se réduit à : $\vec{p} = q \vec{d}$
- où \vec{d} est le vecteur reliant $-q$ à $+q$ ($\|\vec{d}\|$ = distance entre $-q$ et $+q$).

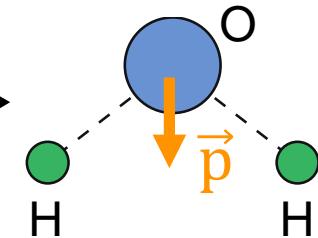


- Le moment dipolaire mesure donc l'intensité et l'orientation du décalage des barycentres des charges.
- Le module du moment dipolaire se mesure en Coulombs x mètres.

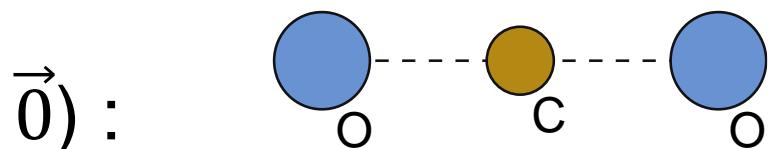
Mais on l'exprime souvent en Debyes (D), avec un facteur de conversion : 1 $D = 3,34 \cdot 10^{-30}$ C.m.

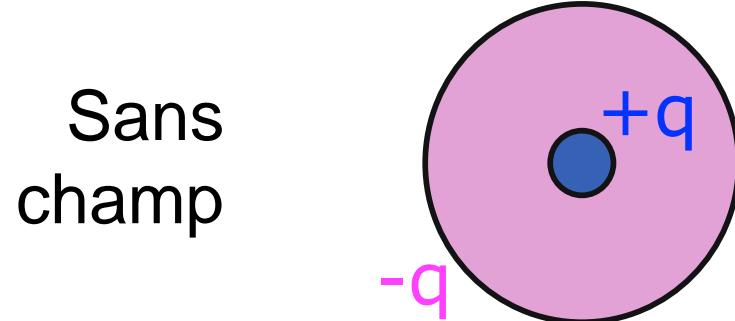
- Moments dipolaires permanents de quelques molécules (en Debyes) :

Molécule	Formule	Moment Dipolaire $\ \vec{p}\ $
Acide Chlorhydrique	HCl	1,08 D
Ammoniac	NH ₃	1,47 D
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	1,69 D
Eau	H ₂ O	1,85 D
Dioxyde de Carbone	CO ₂	0

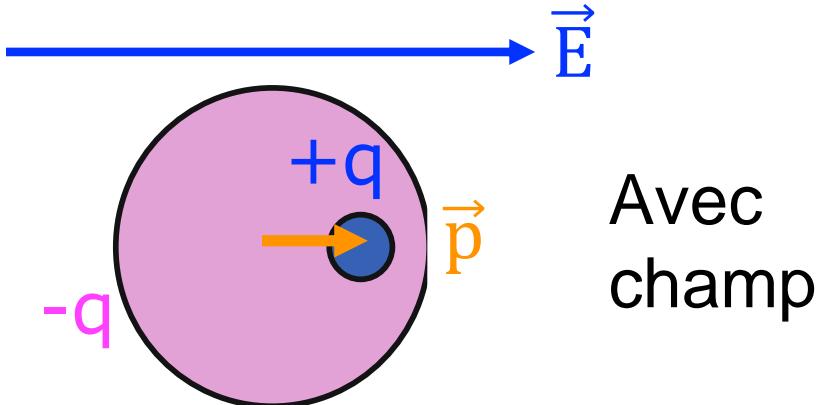


- Les molécules qui possèdent un fort degré de symétrie sont généralement apolaires ($\vec{p} \approx \vec{0}$) :
- On peut faire apparaître un moment dipolaire en soumettant une molécule (ou un atome) à un **champ électrique** : les noyaux et les électrons subissent des forces opposées, et se décalent légèrement.





Sans champ



Avec champ

- La molécule ou l'atome présente alors un moment dipolaire $\vec{p} = \alpha \vec{E}$ où α est la polarisabilité du corps.
- La polarisabilité de quelques atomes ou molécules est donnée ci-dessous en unités de α_0 (où $\alpha_0 = 1,11 \cdot 10^{-40} \text{ C}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$) :

Corps	He	H_2	H_2O	NH_3	CH_4	Cl_2	C_6H_6
Polarisabilité (en unités de α_0)	0,2	0,81	1,48	2,3	2,6	4,6	10,3

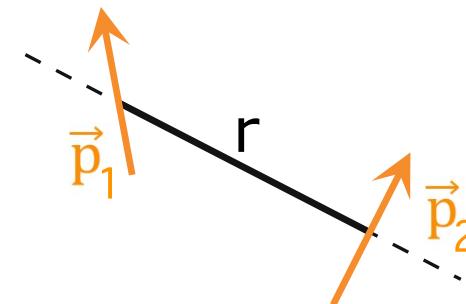
- (Toutes ces valeurs ne sont pas à apprendre par cœur !)

1.4. Forces dérivées de l'électrostatique

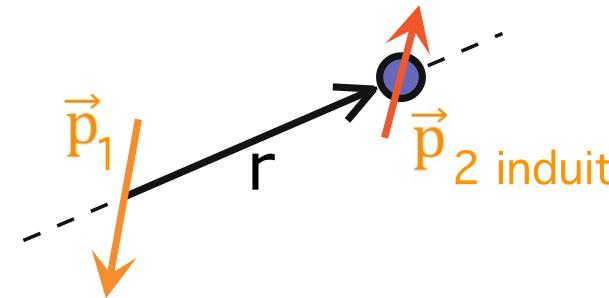
- Les particules (molécules ou atomes) possédant un moment dipolaire permanent peuvent **interagir** entre elles.
- De même, un dipôle peut **induire** un moment dipolaire dans une particule apolaire, ce qui entraîne une interaction mutuelle.
- Enfin, deux particules peuvent avoir une interaction au cours de laquelle il y a **induction mutuelle** de deux dipôles induits.
- Toutes ces interactions entre particules conduisent à des **forces attractives appelées forces de Van der Waals**.
- Ces forces dépendent de nombreux paramètres que l'on ne développera pas ici (moments dipolaires des particules, polarisabilités électroniques, température ...)

- Les principales forces de Van der Waals sont :

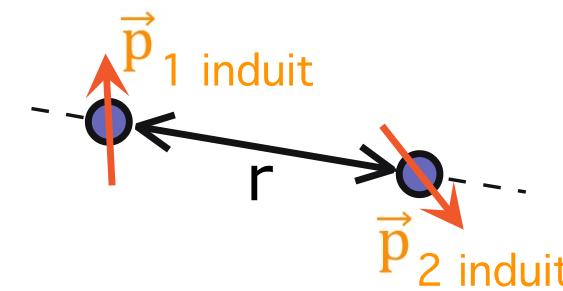
✓ Force de Keesom entre deux dipôles permanents :



✓ Force de Debye entre un dipôle permanent et un dipôle induit :

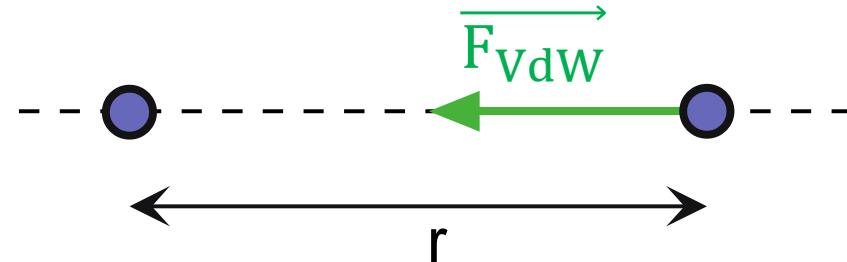


✓ Force de London entre deux dipôles mutuellement induits :



- Toutes ces forces attractives ont en commun de varier en r^{-7} où r est la distance entre les deux particules qui interagissent :

$$\|\overrightarrow{F_{VdW}}\| = F_o \left(\frac{r_o}{r} \right)^7$$



- Ce sont donc des forces à courte portée.
- On verra dans un chapitre ultérieur la relation mathématique entre la force et l'énergie potentielle d'interaction.
- Dans le paragraphe suivant, on va directement présenter l'énergie potentielle de Lennard-Jones, qui est associée à la force de Van der Waals.

1.5. Potentiel de Lennard-Jones

- L'énergie potentielle (ou potentiel) de Lennard-Jones mesure l'énergie d'interaction (en Joules) entre deux atomes dans un gaz monoatomique (de type gaz rare).
- Mais ce potentiel est également applicable à l'interaction dipolaire entre deux particules soumises à des forces de Van der Waals.
- Son expression en fonction de la distance r séparant les deux particules s'écrit :

$$E_p = 4E_o \left[\left(\frac{r_o}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_o}{r} \right)^6 \right]$$

[!]

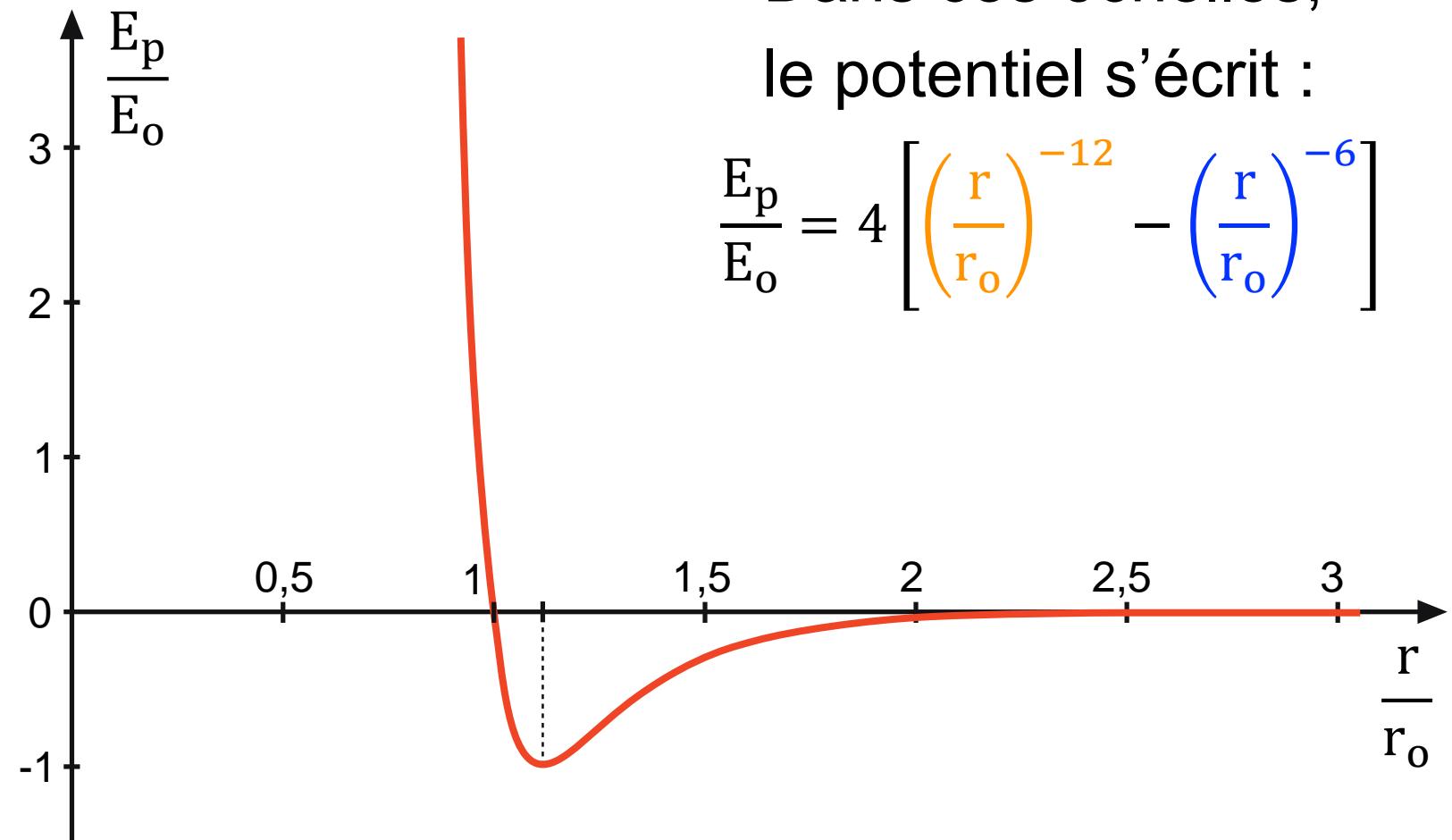
- Nous allons discuter les différents termes de cette expression.

$$E_p = 4E_o \left[\left(\frac{r_o}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_o}{r} \right)^6 \right]$$

- Le terme à la puissance 6 est directement lié à la force attractive de Van der Waals.
- Le terme à la puissance 12 est lié à une force répulsive (qui domine à très courte distance).
- L'exposant 12 de ce terme répulsif est empirique : il modélise la répulsion entre les nuages électroniques des particules. Sa valeur ($12 = 2 \times 6$) permet de calculer diverses propriétés du potentiel.
- On devine que lorsque ces 2 forces antagonistes se compensent, les particules sont dans leur position d'équilibre.

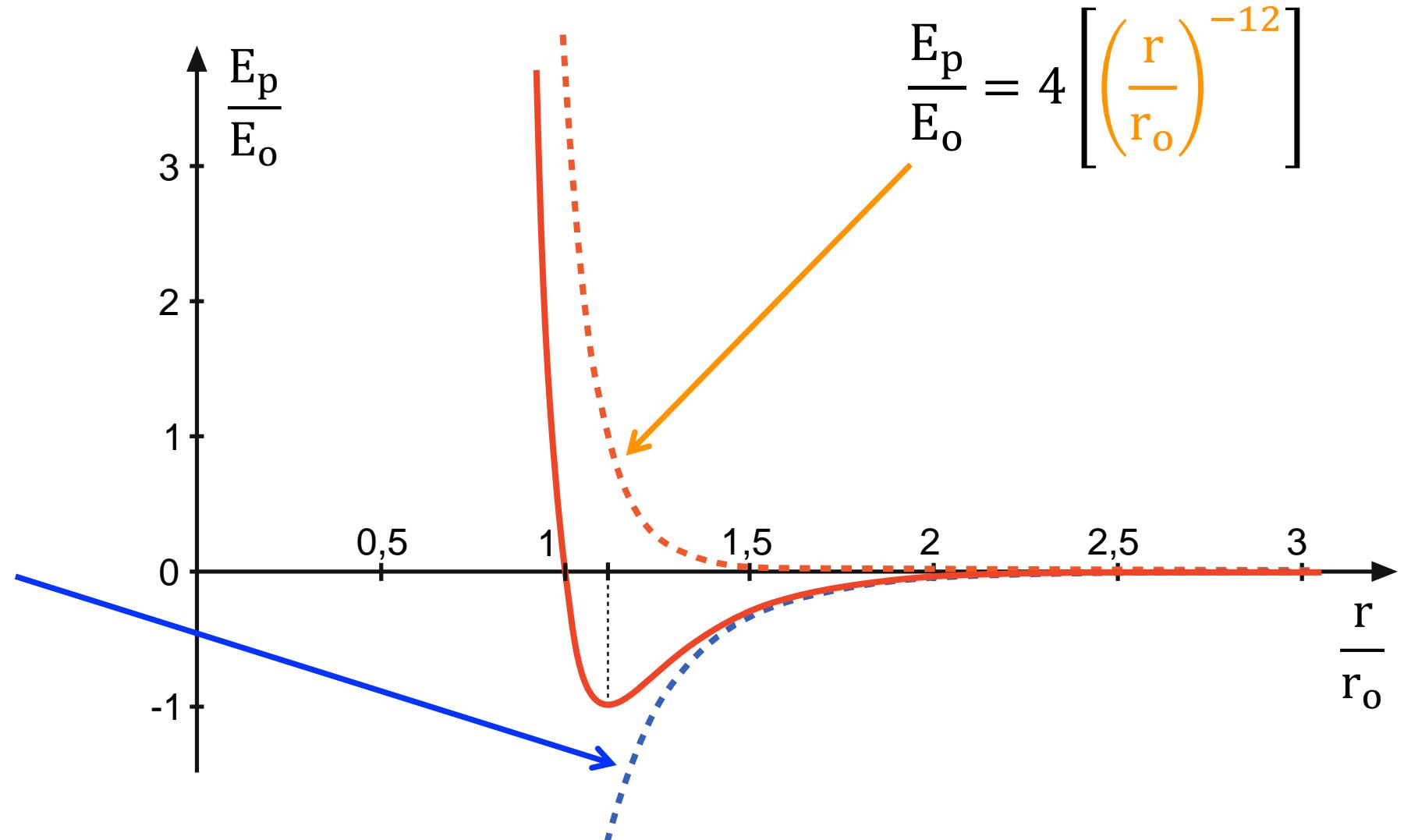
- On représente généralement le potentiel de Lennard-Jones dans des axes adimensionnels : $\frac{E_p}{E_0}$ en fonction de $\frac{r}{r_0}$

- r_0 est une **distance caractéristique** du système.
- Pour $r = r_0$ l'énergie $E_p = 0$ (mais cette valeur de E_p n'a pas d'intérêt physique : une E_p est définie à une constante près).



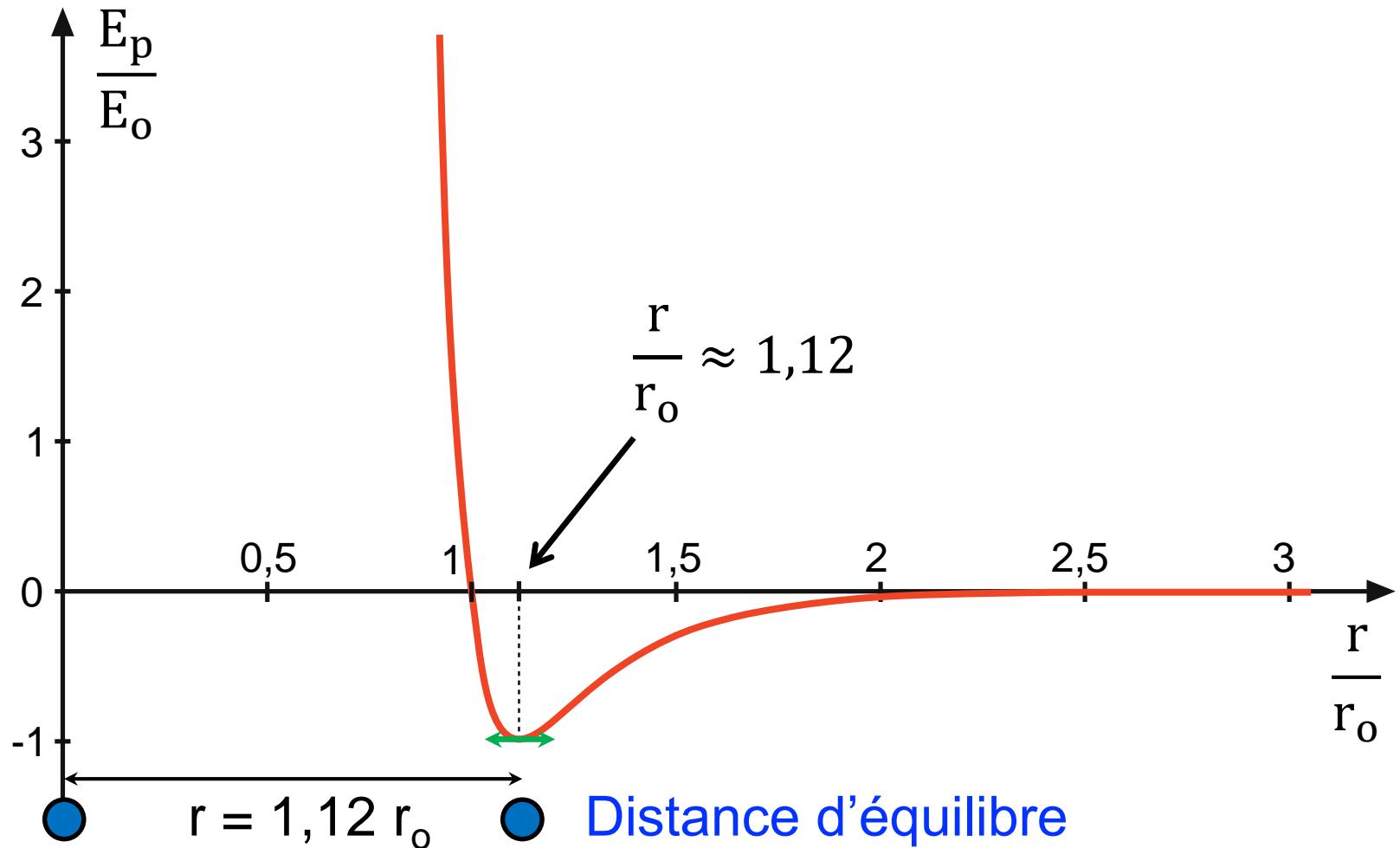
- On peut représenter la somme des 2 contributions :
- Contribution **répulsive** qui varie en r^{-12} (qui domine quand $r < r_o$) :
- Contribution **attractive** qui varie en $-r^{-6}$ (qui domine pour $r > r_o$).

$$\frac{E_p}{E_o} = 4 \left[-\left(\frac{r}{r_o} \right)^{-6} \right]$$



$$\frac{E_p}{E_o} = 4 \left[\left(\frac{r}{r_o} \right)^{-12} \right]$$

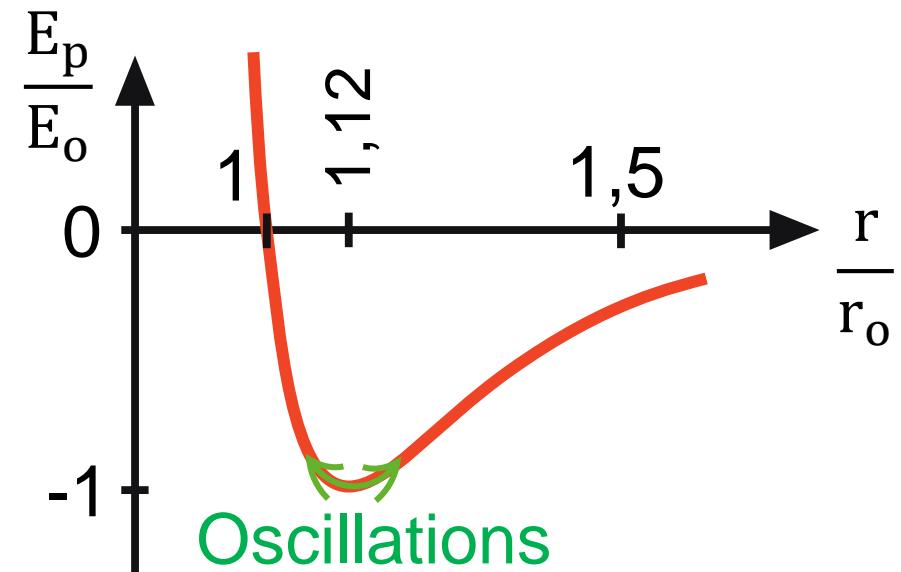
- Le **puits de potentiel** présente un intérêt physique : le **minimum de E_p** correspond à $\frac{dE_p}{dr} = 0$, qui est obtenu pour la distance : $r = 2^{(1/6)} r_o$ soit $r \approx 1,12 r_o$.
- Ce minimum correspond à la **distance d'équilibre** des 2 particules.
- On peut calculer qu'au fond du puits, l'énergie est $E_p = -E_o$.
 → E_o correspond à la **profondeur du puits de potentiel**.



- Remarques sur le potentiel de Lennard-Jones
- On voit que pour des distances de quelques r_o (par exemple r de l'ordre de 2,5 à 3 fois r_o) le potentiel devient quasiment nul : à ces distances, les particules n'interagissent déjà plus.
- La profondeur du puits de potentiel E_o correspond à l'énergie nécessaire pour casser la liaison de Van der Waals.
- Ce potentiel de L-J est très général : on peut l'adapter à différentes particules en ajustant les valeurs de r_o et de E_o aux mesures physiques :

Particule	r_o (Å)	E_o (J)
Argon	3,4	$1,7 \cdot 10^{-21}$
Néon	2,8	$4,8 \cdot 10^{-22}$
Oxygène	3,5	$1,6 \cdot 10^{-21}$

- Remarquons enfin que la distance $r \approx 1,12 r_o$ correspond à une distance d'équilibre **dynamique** : la particule au fond du puits est animée d'un mouvement d'oscillations dû à son énergie thermique.
- Qualitativement, la fusion d'un solide peut se comprendre ainsi : Si la **Température du système augmente**,
 - l'amplitude des oscillations est **de plus en plus grande**,
 - et la particule peut **sortir de la zone** où s'exerce la force de VdW.
- Dans un Chapitre ultérieur, nous étudierons la dynamique de tels mouvement oscillatoires.



Conclusion

- Dans ce Chapitre, on a étudié :
 - La force de Coulomb,
 - La notion de champ électrique,
 - Le moment dipolaire,
 - Les forces dérivées de l'électrostatique, et
 - Le potentiel de Lennard-Jones.
- Dans le Chapitre suivant, on étudiera le lien entre :
 - Forces conservatives et énergies potentielles.

Mentions légales

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'Université Grenoble Alpes (UGA).

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Grenoble Alpes (UGA), et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.