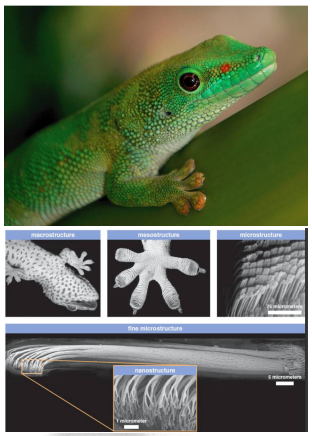
Électromagnétisme

Chapitre EM2 Dipôle électrostatique



Le gecko est un petit lézard qui fascine depuis très longtemps la communauté scientifique. En effet, le gecko est capable de grimper sur des murs et des plafonds de natures très différents tout en se déplaçant rapidement.
L'adhésion des pattes du gecko est due aux forces de Van der Waals car les spatules présentes sur ses pattes approchent la surface à une échelle nanométrique, condition nécessaire pour les forces de Van der Waals significatives qu'à courtes distances.

https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-du-vivant/les-forces-de-van-der-waals-et-le-gecko



Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) est un physicien néerlandais qui a travaillé sur les états liquide et gazeux : compressibilité des gaz, équation d'état de van der Waals (« amélioration » de la loi de gaz parfaits), découverte des forces de cohésion à courtes distances (dites forces de van der Waals). Il est lauréat du Prix Nobel de physique en 1910 pour ses travaux sur l'équation d'état des gaz et des liquides.



Peter Joseph Wilhelm Debye (1884-1966) est un physicien et chimiste néerlandais. Il est lauréat du Prix Nobel de chimie de 1936 pour ses contributions à notre connaissance de la structure moléculaire grâce à ses recherches sur les moments dipolaires et sur la diffraction des rayons X et des électrons dans les gaz.

Pré-requis

- PCSI : Approche énergétique en mécanique du point (énergie potentielle, équilibre, analyse des courbes d'énergie potentielle)
- PCSI (chimie) : molécule polaire / apolaire, interactions intermoléculaires (Van der Waals).
- PC : chap EM1. Électrostatique

∑ Point maths – Cf « Outils mathématiques »

- Analyse vectorielle : $(\overrightarrow{b} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\overrightarrow{a}$

Objectifs du chapitre

- Décrire le modèle du dipôle électrostatique.
- Établir les propriétés du champ électrostatique et du potentiel électrostatique créés par un dipôle électrostatique.
- Décrire les effets mécaniques d'un champ électrostatique extérieur sur un dipôle.
- Faire le lien avec le cours de chimie sur les interactions intermoléculaires.

Plan du cours

I Modélisation **3**
I.1 Dipôle . . . 3
I.2 Approximation dipolaire . . . 3
I.3 Moment dipolaire . . . 3

II Potentiel et champ **4**
II.1 Potentiel électrostatique . . . 4
II.2 Champ électrostatique . . . 4
II.3 Carte de champ . . . 5

III Actions mécaniques sur un dipôle **5**
III.1 Résultante et moment . . . 5
III.2 Énergie potentielle d'un dipôle rigide . . . 6
III.3 Analyse qualitative . . . 6

IV Interactions intermoléculaires **6**
IV.1 Solvatation des ions . . . 6
IV.2 Dipôle induit et polarisabilité . . . 7
IV.2.a) Dipôle induit . . . 7
IV.2.b) Polarisabilité . . . 8
IV.2.c) Interaction molécule-molécule . . . 8

Programme officiel

Notions et contenus	Capacités exigibles
5.2 Électrostatique	
5.2.2. Exemples de champs électrostatiques	
Dipôle électrostatique. Moment dipolaire.	Citer les conditions de l'approximation dipolaire.
Potentiel et champ créés par un dipôle.	Établir l'expression du potentiel électrostatique. Comparer la décroissance du champ et du potentiel avec la distance dans le cas d'une charge ponctuelle et dans le cas d'un dipôle. Tracer l'allure des lignes de champ électrostatique engendrées par un dipôle.
Actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure : résultante et moment.	Utiliser les expressions fournies de la résultante et du moment des actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure.
Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.	Utiliser l'expression fournie de l'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure. Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.
Interactions ion-molécule et molécule-molécule.	Expliquer qualitativement la solvatation des ions dans un solvant polaire.
Dipôle induit. Polarisabilité.	Associer la polarisabilité et le volume de l'atome en ordre de grandeur.

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – ☺ – ☹ – Quel est le modèle du dipôle électrostatique ?
2 – ☺ – ☹ – Donner le cadre de l'approximation dipolaire.
3 – ☺ – ☹ – Établir l'expression du potentiel électrostatique créé par un dipôle électrostatique. En déduire l'expression du champ électrostatique. Comment évoluent-ils avec la distance ? Comparer à celles de ceux créés par une charge ponctuelle.
4 – ☺ – ☹ – Représenter les lignes de champ et les courbes équipotentielles créées par un dipôle.
5 – ☺ – ☹ – Décrire qualitativement l'effet d'un champ électrostatique extérieur sur un dipôle rigide.
6 – ☺ – ☹ – Expliquer qualitativement la solvatation des ions dans un solvant polaire.
7 – ☺ – ☹ – Définir la polarisabilité d'un atome. Relier la polarisabilité au volume de l'atome en ordre de grandeur.

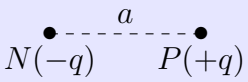
FlashCards :

I Modélisation

I.1 Dipôle

Définition – Dipôle électrostatique

Un **dipôle électrostatique** est un ensemble de **deux charges ponctuelles opposées** q et $-q$ situées en deux positions **distinctes**.



Plus généralement, cela décrit un système **globalement neutre** dont le **barycentre** P des charges positives et le barycentre N des charges négatives **ne sont pas confondus**.

I.2 Approximation dipolaire

À retenir – Approximation dipolaire

On étudie le dipôle électrostatique dans l'**approximation dipolaire**, c'est-à-dire on étudie ses propriétés **à grande distance devant la taille caractéristique du dipôle**.

I.3 Moment dipolaire

Définition – Moment dipolaire

Soit un dipôle électrostatique, on note P le barycentre des charges positives ($+q > 0$) et N le barycentre des charges négatives ($-q < 0$).

On définit le **moment dipolaire** par :

$$\vec{p} = q\,\overrightarrow{NP}$$

- Dirigé selon la droite (NP) ;
- De la charge négative vers la charge positive ;
- De norme $p = qa$, avec $a = NP$.
- p en $\mathrm{C}\cdot\mathrm{m}$

Remarques – Debye

Usuellement, on utilise le debye (D), avec $1\ \mathrm{D} = 3,34.10^{-30}\ \mathrm{C}\cdot\mathrm{m}$, plus adapté à l'échelle moléculaire.

Ordres de grandeur :

Molécule	Moment dipolaire permanent (D)
chlorure d'hydrogène HCl	1,08
eau H_2O	1,85
monoxyde de carbone CO	0,11
ammoniac NH_3	1,49
acide nitrique HNO_3	2,17
propène CH_3CHCH_2	0,35
éthanol CH_3CH_2OH	1,70
éthanal CH_3CHO	2,70

Activité n°1 – Molécule d'eau

Dans la molécule d'eau, l'angle entre les deux liaisons O−H est de $104,5°$ et ces deux liaisons sont de longueur $95,84$ pm. Déterminer la charge partielle portée par chaque atome d'hydrogène. L'exprimer en pourcentage de la charge élémentaire.

Remarques – Molécule de plus de 2 atomes

Pour une molécule composée de plus de 2 atomes, son moment dipolaire permanent [a] est égal à la somme vectorielle des moments dipolaires de chaque liaison i : $\overrightarrow{p} = \sum_i \overrightarrow{p_i}$

Pour savoir si $\overrightarrow{p} = \overrightarrow{0}$ ou $\overrightarrow{p} \neq \overrightarrow{0}$, il faut connaître la géométrie de la molécule (Lewis + VSEPR) pour savoir si les barycentres des charges positives et négatives sont distincts :

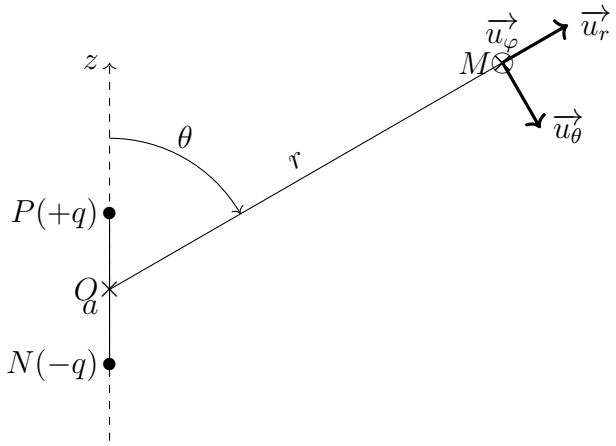
- Une molécule polaire est une molécule telle que $\overrightarrow{p} \neq \overrightarrow{0}$ (ex : H_2O est coudée et polaire).
- Une molécule apolaire est une molécule telle que $\overrightarrow{p} = \overrightarrow{0}$ (ex : CO_2 est linéaire et apolaire).

a. On parle de moment dipolaire permanent, à distinguer des moments dipolaires induits et instantanés mis en jeu dans les interactions de Van der Waals de type Debye et London, cf cours de chimie de PCSI.

II Potentiel et champ

II.1 Potentiel électrostatique

On considère le dipôle électrostatique ci-contre.
La charge positive $P(+q)$ (ou le barycentre des charges positives) est située en $z_P = +\frac{a}{2}$.
La charge négative $N(-q)$ (ou le barycentre des charges négatives) est située en $z_N = -\frac{a}{2}$.
On se place en coordonnée sphérique, de centre O, le milieu du segment $[NP]$ et d'axe (Oz).
On note θ l'angle entre l'axe (Oz) (et donc $\overrightarrow{NP}$) et $\overrightarrow{OM}$.



Démonstration à maîtriser n°2 – Potentiel électrostatique

Q1. Par étude des invariances, déterminer la(les) variable(s) dont dépend le potentiel.

Q2. En utilisant le théorème de superposition, exprimer le potentiel créé en M par le dipôle.

Q3. Exprimer NM en utilisant la relation de Chasles en passant par O.

Q4. Utiliser l'approximation dipolaire et exprimer NM au premier ordre en $\frac{a}{r}$.

Q5. Procéder de même pour PM.

Q6. En déduire l'expression du potentiel créé par le dipôle au premier ordre en $\frac{a}{r}$.

Q7. Comment évolue-t-il avec la distance r ? Comparer au cas de la charge ponctuelle.

Q8. L'exprimer à l'aide de $\overrightarrow{p}$ et $\overrightarrow{OM}$.

II.2 Champ électrostatique

Démonstration à maîtriser n°3 – Champ électrostatique

Q1. Par étude des symétries et invariances, déterminer la forme générale du champ électrostatique.

Q2. Exprimer le champ électrostatique.

Q3. Commenter l'évolution de la norme du champ électrostatique avec la distance r.

Q4. Montrer que le champ peut également s'écrire $\overrightarrow{E}(M) = \dfrac{3\left(\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{OM}\right)\overrightarrow{OM} - OM^2\overrightarrow{p}}{4\pi\varepsilon_0 OM^5}$

II.3 Carte de champ

À retenir – Carte de champ et des équipotentielles d'un dipôle

Vous devez pouvoir reproduire cette figure (sans oublier de placer les charges / orienter le moment dipolaire, et orienter les lignes de champ).

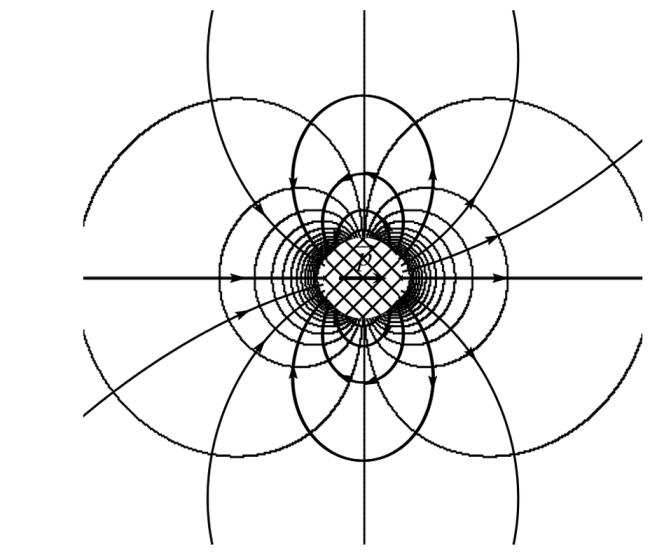


FIGURE 1 – Lignes de champ et équipotentielles créées par un dipôle électrostatique *(D'après Tout-en-un PC-PC*, Dunod*

La zone hachurée est trop près du dipôle, l'approximation dipolaire n'y est pas valable.

Activité n°4 –

Q1. Analyser la carte en terme de propriétés de symétries du champ.

Q2. Comment sont les équipotentielles par rapport aux lignes de champ ?

III Actions mécaniques subies par un dipôle dans un champ extérieur

Dans cette partie on s'intéresse à l'action mécanique subie par un dipôle plongé dans un champ électrostatique extérieur. Ce champ $\overrightarrow{E_{\text{ext}}}$ extérieur peut être non uniforme. Cependant, dans le cadre de l'approximation dipolaire, la **distance PN est faible** devant les distances caractéristiques du problème, donc **devant la distance caractéristique de variation du champ extérieur**.

Conformément au programme, les expressions qui suivent seront toujours fournies. Vous devez savoir les utiliser, et vous devez savoir interpréter qualitativement l'effet du champ extérieur sur le dipôle.

III.1 Résultante et moment

Force et moment résultant (Relations admises et fournies)

- La résultante des actions subies par un dipôle plongé dans un champ électrostatique extérieur $\overrightarrow{E_{\text{ext}}}$ (pouvant être non uniforme) s'écrit :

$$\overrightarrow{F} = \left(\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\right)\overrightarrow{E_{\text{ext}}}$$

- Le moment des actions subies par un dipôle plongé dans un champ électrostatique extérieur $\overrightarrow{E_{\text{ext}}}$ (pouvant être non uniforme) s'écrit :

$$\overrightarrow{\Gamma_O} = \overrightarrow{p} \wedge \overrightarrow{E_{\text{ext}}}(O)$$

III.2 Énergie potentielle d'un dipôle rigide

Définition – Dipôle rigide

Un **dipôle rigide** est un dipôle dont le **moment dipolaire est constant** (indépendant du champ électrostatique extérieur).

Énergie potentielle (Relation admise et fournie)

L'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique extérieur $\overrightarrow{E_{\text{ext}}}$ (pouvant être non uniforme) s'écrit :

$$\mathscr{E}_p = -\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{E_{\text{ext}}}(O)$$

III.3 Analyse qualitative

Démonstration à maîtriser n°5 – Analyse qualitative de l'action du champ extérieur

Q1. Représenter la courbe de $\mathscr{E}_p$ en fonction de l'angle θ entre le moment dipolaire et le champ électrostatique extérieur.

Q2. Déterminer les positions d'équilibres et étudier leurs stabilités.

Q3. Déterminer le sens du mouvement du dipôle par rapport au champ électrostatique.

Q4. Retrouver ce résultat en étudiant la force $\overrightarrow{F}$.

À retenir – Actions mécaniques d'un champ électrostatique sur un dipôle

L'effet principal d'un champ extérieur sur un dipôle est son **orientation suivant les lignes de champ**. Un dipôle orienté dans le sens du champ est **attiré vers les zones de champ intense**.

Remarques – Four micro-ondes

Dans un four à micro-ondes un champ électrique oscillant à 2,5 GHz (les molécules d'eau absorbent beaucoup dans cette gamme) conduit à la rotation des molécules d'eau qui cherchent toujours à aligner leur moment dipolaire sur le champ. Le mouvement des molécules d'eau conduit à l'élévation de la température par agitation. Les molécules d'eau doivent être libre de mouvement d'où le fait qu'il est difficile de faire fondre des aliments congelés.

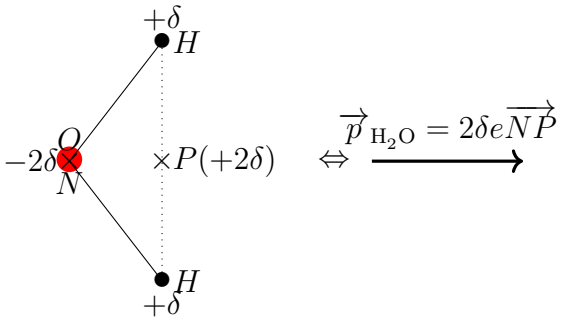
IV Interactions ion-molécule et molécule-molécule

IV.1 Solvatation des ions

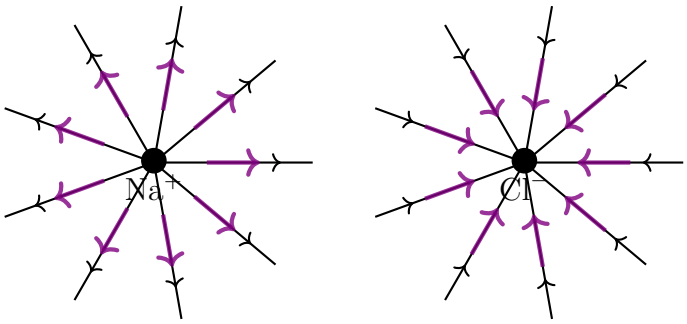
Considérons du sel dans l'eau. Le sel est constitué d'ions sodium Na^+ et chlorure Cl^- que nous assimilons à des charges ponctuelles. Ils créent un champ électrostatique à leur voisinage :

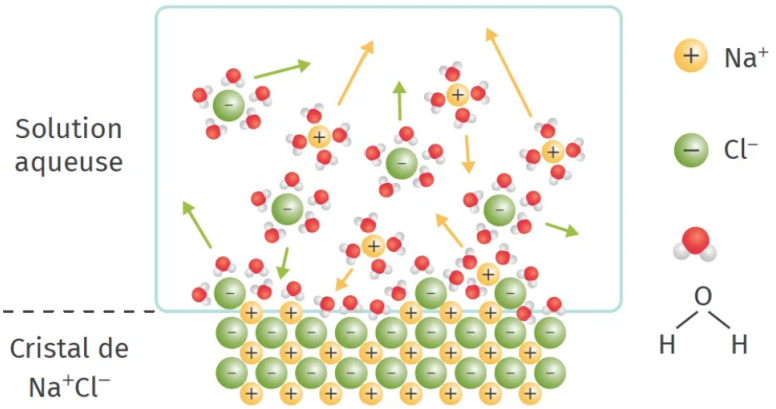
- l'ion Na^+ crée le champ $\overrightarrow{E_{Na^+}} = \dfrac{+e}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\overrightarrow{u_r}$ dont les lignes de champ sont orientés radialement et fuient l'ion,
- l'ion Cl^- crée le champ $\overrightarrow{E_{Cl^-}} = \dfrac{-e}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\overrightarrow{u_r}$ dont les lignes de champ sont orientés radialement vers l'ion.

L'eau est un solvant polaire puisque les molécules d'eau ont un moment dipolaire permanent.



Au voisinage de chaque ion, les molécules d'eau vont s'orienter de sorte que leur moment dipolaire (flèches ⟶ sur le schéma ci-dessous) soit dans le sens des lignes de champ de cet ion, et vont se rapprocher de l'ion, zone où le champ est le plus intense.





Il s'agit du phénomène de **solvatation** : l'ion est alors entouré d'un certain nombre de molécules de solvant, qui masquent en partie la charge de l'ion. Les ions Cl^- et Na^+ se séparent alors les uns des autres (« ils ne se voient plus et ne sont donc plus attirés les uns par les autres) » : le cristal ionique se dissout.

FIGURE 2 – Solvatation des ions (Livre scolaire : https://www.lelivrescolaire.fr/page/6691159)

IV.2 Dipôle induit et polarisabilité

IV.2.a) Dipôle induit

Un atome ou une molécule ne possédant pas de moment dipolaire permanent peut en acquérir un sous l'action d'un champ électrostatique $\overrightarrow{E_{ext}}$, par exemple à l'approche d'une molécule possédant un moment dipolaire permanent.

En effet, **sous l'action d'un champ électrostatique extérieur, les charges positives et les charges négatives se déplacent en sens opposé**, donc les barycentres des charges positives et des charges négatives font de même. Dans le cas d'une molécule sans moment dipolaire permanent, les barycentres ne sont alors plus confondus. La **molécule acquiert alors un moment dipolaire** qu'on qualifie de **moment dipolaire induit**.

On notera que les **moments dipolaires induits sont négligeables devant les moments dipolaires permanents** lorsque ceux-ci existent.

À retenir – Moment dipolaire induit

Dans l'approximation linéaire qui est valable pour les champs faibles, le moment dipolaire induit est proportionnel au champ $\overrightarrow{E_{ext}}$:

$$\overrightarrow{p} = \alpha\varepsilon_0\overrightarrow{E_{ext}}$$

où α est un coefficient positif appelé **polarisabilité**, en m^3.

Activité n°6 –

Retrouver la dimension ou l'unité de α.

IV.2.b) Polarisabilité

En 1904, le physicien anglais Sir Joseph-John THOMSON * propose le modèle suivant de l'atome :

- la charge positive $Q = Ze$ de l'atome est répartie uniformément dans une sphère de rayon a,
- les électrons, assimilés à des points matériels, se déplacent librement à l'intérieur de cette sphère.

Ce modèle permet d'expliquer la polarisabilité des atomes.

On rappelle que le champ créé par le noyau (de charge $+Ze$ et de rayon a) à l'intérieur de celui-ci ($r < a$) s'écrit $\overrightarrow{E} = \dfrac{Zer}{4\pi\varepsilon_0 a^3}\overrightarrow{u_r}$.

Démonstration à maîtriser n°7 – Polarisabilité

Q1. En l'absence de champ extérieur, quelle est la position d'équilibre des électrons (notée O) ? Que peut-on dire du barycentre P des charges positives et de N celui des charges négatives.

Q2. Déterminer le vecteur position $\overrightarrow{OM_{\text{éq}}}$ de chaque électron plongé en plus dans un champ extérieur $\overrightarrow{E_{\text{ext}}}$.

Q3. En déduire le moment dipolaire induit de l'atome dû au champ électrostatique $\overrightarrow{E_{\text{ext}}}$.

Q4. En déduire la polarisabilité. Commenter.

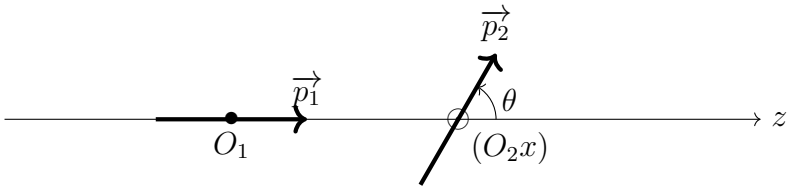
Q5. Pour l'atome d'hydrogène, $a = 52,9$ pm. Déterminer la polarisabilité par le modèle présenté. L'expérience donne $8,42.10^{-30}$ m^3. Commenter.

IV.2.c) Interaction molécule-molécule

Le modèle dipolaire permet de décrire † les interactions de Van der Waals entre atomes ou molécules (cf cours de chimie PCSI). Selon que les molécules possèdent un moment dipolaire permanent (=molécule polaire) ou qu'elles peuvent en acquérir un sous l'effet d'un champ électrique (dipôle induit), trois types d'interaction peuvent être distinguées :

- l'interaction de Keesom entre deux dipôles permanents,
- l'interaction de Debye entre un dipôle permanent et un dipôle induit,
- l'interaction de London entre deux dipôles induits.

Considérons deux molécules polaires, de moments dipolaires $\overrightarrow{p_1}$ et $\overrightarrow{p_2}$ respectivement situées en O_1 et O_2. Supposons que la molécule (1) est fixe en O_1, et que la molécule (2) peut tourner autour de son axe (O_2x).



Le champ électrostatique $\overrightarrow{E_1}(O_2)$ créé en O_2 par la molécule (1) vaut $\overrightarrow{E_1}(O_2) = \dfrac{2p_1}{4\pi\varepsilon_0 z^3}\overrightarrow{u_z}$.

L'énergie potentielle de la molécule (2) plongée dans ce champ s'écrit : $\mathscr{E}_p = -\overrightarrow{p_2} \cdot \overrightarrow{E_1}(O_2) = -\dfrac{p_1 p_2 \cos(\theta)}{2\pi\varepsilon_0 z^3}$.

À z fixé, $\mathscr{E}_p$ est minimale lorsque $\theta = 0$: le dipôle $\overrightarrow{p_2}$ s'aligne dans la direction et le sens du champ électrostatique créé par le dipôle (1) et l'interaction entre les molécules est attractive : $\mathscr{E}_p$ diminue quand z diminue.

Le modèle des deux molécules isolées est bien entendu très simpliste. Dans un milieu, l'alignement des moments dipolaires est perturbé par l'agitation thermique : les énergies d'interaction de Van der Waals dépendent de la température et varient en $\dfrac{1}{r^6}$ où r est la distance entre les molécules. La force de Van der Waals varie par conséquent en $\dfrac{1}{r^7}$.

∗. Il a reçu le prix Nobel de physique de 1906 pour « ses recherches théoriques et expérimentales sur la conductivité électrique dans les gaz », qui ont fourni les preuves de l'existence de l'électron.

†. Pour bien les comprendre et les décrire, il faut se placer dans le cadre de la mécanique quantique...)