

Expérience de Desaguliers

1. Durée de passage dans la zone de champ variable

Après avoir réglé de débit du robinet pour que le diamètre du filet d'eau dans la zone utile soit $d \approx 3 \text{ mm}$, on peut mesurer la quantité d'eau écoulée en 30 secondes : le débit est $D \approx 7 \text{ mL.s}^{-1}$ donc la vitesse est $v \approx 1 \text{ m.s}^{-1}$.

En supposant que la longueur d'entrée dans la zone utile est $L \approx 2 \text{ cm}$, la durée d'action est $T_1 \approx 0,02 \text{ s}$.

2. Durée de polarisation par orientation des molécules d'eau

Pour orienter une molécule d'eau, il suffit de déplacer les deux protons : les électrons sont négligeables et les protons tournent autour du centre d'inertie, quasi confondu avec le centre de l'atome d'oxygène. Le moment d'inertie correspondant est donc $J \approx 2 m_H d_{OH}^2 \approx 3.10^{-47} \text{ kg.m}^2$.

Le moment algébrique des forces électrostatiques est $M = p E \sin(\theta)$ avec $p \approx 6.10^{-30} \text{ C.m}$ (moment dipolaire) et un champ électrique $E \approx 10000 \text{ V.m}^{-1}$ (par frottement on accumule aisément $\approx 10^{10}$ charges élémentaires, donc $\approx 1 \text{ nC}$, qu'on peut approcher à moins de $\approx 1 \text{ cm}$).

L'équation décrivant la rotation est donc de la forme $\ddot{\theta} + \omega^2 \sin(\theta) = 0$, avec $\omega = \sqrt{\frac{pE}{J}} \approx 5.10^9 \text{ rad.s}^{-1}$, ce qui correspond à une durée de retournement $T_2 \approx \frac{\pi}{\omega} \approx 10 \text{ ps}$ (ou un peu moins si le champ E est plus grand).

Puisque $T_2 \ll T_1$, l'eau a donc très largement le temps de se polariser par orientation, puis elle est attirée dans la région de champ plus fort.

3. Durée de polarisation par déplacement d'ions

On suppose assez probable que la durée nécessaire pour mettre les charges en mouvement soit nettement inférieure à la durée nécessaire pour accumuler en surface une quantité de charge suffisante.

Pour polariser par déplacement d'ions, il faut accumuler des charges surfaciques $\sigma = \frac{q}{S}$ telles que $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ (modèle du plan uniformément chargé).

Le courant est : $I = j S = \gamma E S$ avec $\gamma \approx \sqrt{K_e} (\lambda_{H^+} + \lambda_{OH^-}) \approx 6.10^{-6} \text{ S.m}^{-1}$ (conductivité) pour l'eau pure. La durée pour accumuler les charges est : $T_3 = \frac{q}{I} = \frac{2\epsilon_0}{\gamma} \approx 3 \mu\text{s}$.

D'un autre point de vue, en pratique $\gamma \approx 10^{-3} \text{ S.m}^{-1}$ pour l'eau du robinet (elle contient des composés minéraux et du CO₂ dissous). La durée pour accumuler les charges est nettement plus faible, mais reste supérieure à la durée d'orientation : $T_3 \approx 20 \text{ ps}$.

Puisque $T_3 > T_2$, on peut considérer que la polarisation se fait initialement surtout par orientation.

4. Déplacement d'ions dans l'eau déjà polarisée par orientation

Lorsque le champ extérieur est très grand, le champ intérieur ne peut pas être rendu nul par les effets de polarisation par orientation : même si toutes les molécules s'orientent de façon optimale, cela ne donne pas des charges surfaciques suffisantes. On suppose que ce n'est pas le cas ici.

Mais en outre, même pour un champ extérieur plus modéré, la polarisation par orientation n'est jamais complète à cause de l'agitation thermique.

Dans les situations d'équilibre, le champ intérieur est divisé par $\varepsilon_r = 80$, mais en est-il exactement de même en régime variable ?

L'énergie potentielle est $\mathcal{E}_p = p E \cos(\theta)$ et sa valeur moyenne est : $\langle \mathcal{E}_p \rangle = p E \frac{\int_{-1}^1 u e^{\beta u} du}{\int_{-1}^1 e^{\beta u} du}$ avec $\beta = \frac{p E}{k T}$ (où k est la constante de Boltzmann, décrivant l'effet de l'agitation thermique).

La polarisation est ainsi (pour les champs modérés) : $P = n p \cdot \left(\coth(\beta) - \frac{1}{\beta} \right) \approx \frac{n \beta p}{3}$ en notant n la concentration des dipôles. On en déduit la susceptibilité électrique : $\chi_e \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P}{\varepsilon_0 E} = \frac{n p^2}{3 \varepsilon_0 k T}$.

On en déduit ensuite que, dans un premier temps, l'orientation rapide des dipôles conduit à une atténuation du champ intérieur d'un facteur 28 (pour une permittivité relative $\varepsilon_r = 80$).

Dans ces conditions, il s'ensuit que pour polariser par déplacement d'ions (en remplaçant ainsi progressivement l'effet d'orientation), il faut accumuler des charges surfaciques $\sigma = \frac{q}{S}$ telles que $E = \frac{\sigma}{2 \varepsilon_0}$, mais avec un courant $I = j S = \gamma E' S$ où $E' \approx \frac{E}{28}$.

La durée pour accumuler les charges dans l'eau pure est alors : $T_4 = \frac{q}{I} = \frac{2 \varepsilon_0}{\gamma} \frac{E}{E'} \approx 0,1 \text{ ms}$ c'est à dire tout de même nettement inférieure à la durée de passage dans la zone active... donc le changement de nature de la polarisation est complet. A fortiori, dans l'eau du robinet, le changement prend moins de temps : $T_4 \approx 0,6 \mu\text{s}$.

5. Conclusion

Bien que la polarisation se fasse d'abord par orientation, l'attraction du filet d'eau par la zone de champ fort est finalement principalement due à une polarisation par déplacement d'ions : cette expérience ne peut donc pas **démontrer** l'orientation des dipôles H₂O sous l'effet du champ électrique.

Par contre, pour l'eau contenue dans les aliments à l'intérieur d'un four micro-ondes, la fréquence caractéristique 2,4 GHz correspond à une durée $T_5 \approx 0,4 \text{ ns} > T_3$ permettant la polarisation par orientation, mais $T_5 \ll T_3$ très insuffisante pour déplacer des ions : le chauffage par agitation des molécules est basé sur l'effet d'orientation des moments dipolaires des molécules (puis la dissipation de l'énergie lors des interactions microscopiques associées à l'agitation thermique).