



Rapport de stage :
Simulations moléculaires d'électrodes capacitives

LOU CHAO Heiarri M2 Physique Numérique
Établissement d'accueil : Laboratoire de Mécanique et de
Génie Civil
Encadrants : Katerina Ioannidou, Romain Dupuis

Table des matières

1	Présentation du système modèle	2
1.1	Description du modèle	2
1.2	Construction du modèle	2
1.3	Déroulement et détails des simulations	4
2	Présentation des méthodes utilisées	7
3	Résultats et discussion	8
4	Conclusion	9
A	Construction des configurations initiales avec <i>Packmol</i>	10
B	Conversion des fichiers de configurations initiales au format <i>LAMMPS</i>	11

Introduction

En 2019, la consommation mondiale d'énergie finale a doublé par rapport à 1973 et a dépassé la barre des 400 EJ, dont 19.7 % d'électricité [1].

Les énergies renouvelables sont une des solutions pour répondre à cette demande croissante d'électricité tout en respectant l'environnement. Cependant, les périodes de production ne coïncidant pas nécessairement avec les périodes de consommation – le cycle diurne étant un exemple – il est nécessaire de pouvoir stocker efficacement l'énergie produite en attendant qu'elle soit consommée.

Les supercondensateurs sont une bonne piste pour le stockage d'énergie. Ils sont composés d'électrodes poreuses séparées par une membrane perméable et plongées dans un électrolyte. Ceci permet le déplacement des charges d'une électrode à l'autre lorsque l'appareil est en charge ou en décharge (FIG. 1).

Ils se situent entre les batteries et les condensateurs en termes de densité d'énergie et de puissance, ainsi leur utilisation est répandue pour les véhicules électriques, systèmes d'alimentation sans fil ou encore appareils portables.

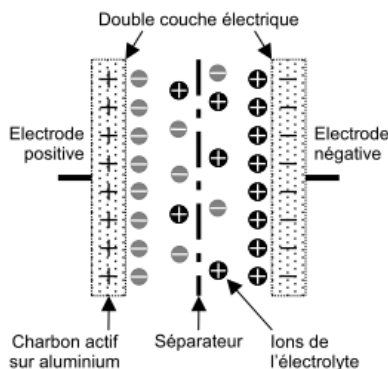


FIGURE 1 – Schéma d'un supercondensateur

Les supercondensateurs ont été le sujet d'un bon nombre d'études. En effet, des recherches se basant sur la Dynamique Moléculaire ont déjà été réalisées sur : les électrolytes[2], les matériaux d'électrodes[3], et leurs performances[4].

Malgré son importance, la complexité de la structure de ces électrodes est trop grande pour l'étude que nous avons envisagée, notamment à cause de leur porosité, de la présence de réseaux de pores et de défauts[5]. Ainsi, nous avons choisi d'étudier un système modèle pour nous concentrer sur l'observation des mécanismes de base de ces appareils, comme l'adsorption des ions et la formation de la Double Couche Électrique (EDL). En faisant cela, nous espérons pouvoir mieux comprendre le fonctionnement des supercondensateurs.

Dans un premier temps, nous présentons ce système modèle : ses caractéristiques, sa construction et sa mise en place. Puis, nous discutons des outils que nous utilisons dans nos simulations, à savoir le potentiel réactif *ReaxFF*[6][7][8], la mise en place de la polarisation du système à l'aide d'*EChemDID*[9], et leur implémentation au sein de *LAMMPS*. Enfin, nous présentons les résultats obtenus et observations faites lors de cette étude, notamment par rapport à l'adsorption des ions à la surface des électrodes, l'influence de leurs défauts, et la répartition des charges en leur sein.

1 Présentation du système modèle

Comme mentionné précédemment, à cause de la complexité du système il est préférable pour cette étude de considérer un système modèle.

1.1 Description du modèle

Le système modèle est composé d'électrodes en graphites immergées dans un électrolyte aqueux d'hydroxyde de sodium, et sa structure est présentée à la FIG. 2.

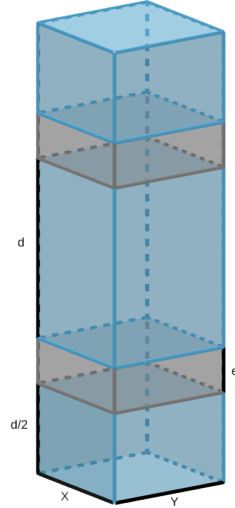


FIGURE 2 – Schéma de la structure du système modèle

Ses dimensions finales sont de 22.104, 21.270 et 39.392 Å, et les électrodes sont séparées d'environ 20 Å entre elles directement et à travers les conditions périodiques selon l'axe $[OZ]$.

Chaque électrode comprend 540 atomes de carbone. Après calcul, le nombre des molécules d'eau s'élèvent à 314. Quant aux ions de l'électrolyte, nous avons choisi d'en introduire une dizaine de chaque pour pouvoir observer leurs déplacements.

Ainsi, le nombre total de particules dans le système s'élève à 2984.

1.2 Construction du modèle

Pour construire la structure du modèle, la démarche FIG. 3 a été adoptée.

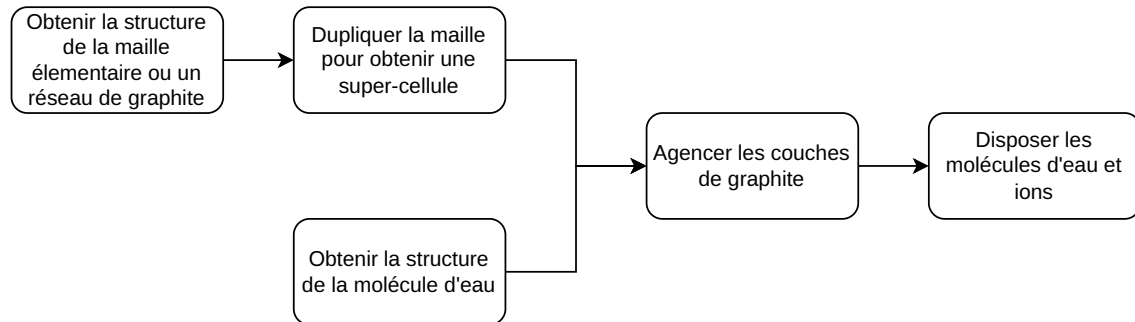


FIGURE 3 – Démarche de construction de la structure

Tout d'abord, les données sur les structures des molécules ont été obtenues grâce à la Crystallography Open Database (COD) et celles-ci sont présentées à la FIG. 4.

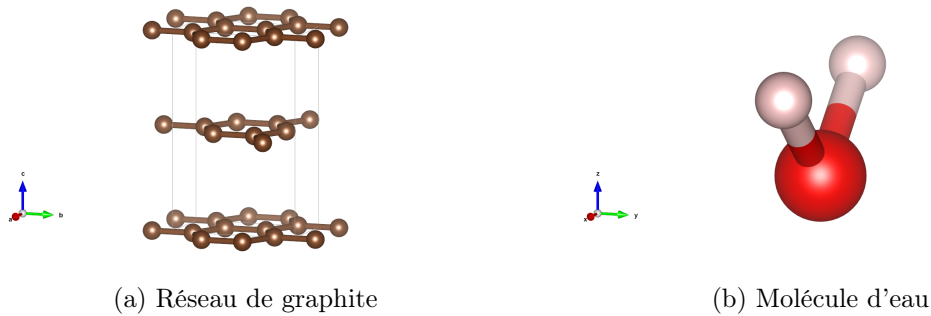


FIGURE 4 – Structures des molécules provenant de la COD

Puis, la structure de graphite de base a pu être étendue grâce à un logiciel tier[10], 9 fois selon la direction $[OX)$ et 5 fois selon la direction $[OY)$ afin que les dimensions dans ces directions soient du même ordre, pour obtenir une électrode de graphite (TAB. 1 et FIG. 5).

Structure	X [Å]	Y [Å]	Z [Å]
Graphite de base	2.456	4.254	6.696
Électrode de graphite	22.104	21.270	6.696

TABLE 1 – Dimensions des sctructures

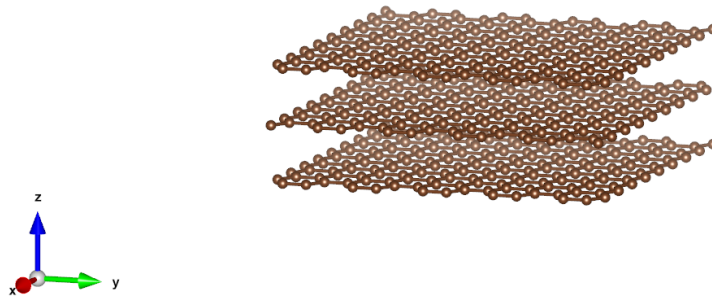


FIGURE 5 – Électrode obtenue après duplication du réseau de graphite

Enfin, les molécules ont pu être disposées pour construire le modèle à l'aide de *Packmol*[11], ANNEXE A.

Pour obtenir des configurations initiales suffisamment stables nous avons choisi de répartir les entités en les séparant d'au moins 2.5 Å : entre les molécules et ions de l'électrolyte, et entre les particules de l'électrolyte et les électrodes.

Pour respecter les conditions aux limites périodiques, cette séparation a également été appliquée aux bords du système : nous ajoutons un retrait égal à la moitié de cette

séparation à chaque bord.

Finalement, nous obtenons la configuration présentée à la figure FIG. 6.

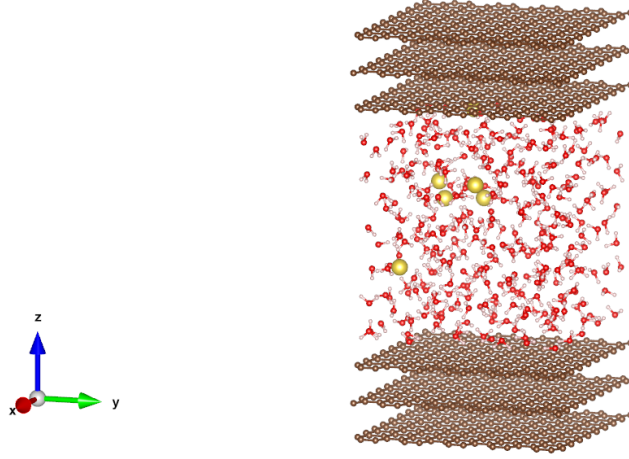


FIGURE 6 – Structure finale obtenue après agencement des molécules

1.3 Déroulement et détails des simulations

Pour toutes les simulations, le déroulement de la FIG. 7 a été adopté.

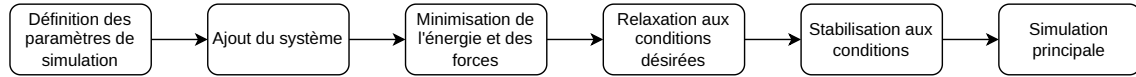


FIGURE 7 – Déroulement des simulations

Pour la paramétrisation de la simulation :

- les simulations ont un pas de temps (désigné **timestep**) de 0.1 fs afin de prendre en compte les vibrations intramoléculaires (notamment celles de la molécule d'eau).
- les interactions sont basés sur le potentiel réactif *ReaxFF* dont nous discutons plus loin ().
- la polarisation du système, c'est-à-dire la mise en place de la différence de potentiel entre les électrodes, est réalisée grâce à *EChemDID* que nous détaillons plus tard ().

Quant à l'ajout du système, ceci est effectué avec une commande *LAMMPS* de lecture de données. Pour cela, il est nécessaire de convertir les données des positions des particules du système en données *LAMMPS*, nous détaillons la démarche suivie à l'ANNEXE B.

Ensuite, la minimisation est réalisée par *LAMMPS*, elle consiste à déplacer les particules du système sans dynamique de manière à minimiser l'énergie potentielle et les forces totales du système. Cette procédure suit un algorithme de gradient conjugué avec pour fonction objectif l'énergie potentielle totale :

$$E(r_1, r_2, \dots, r_N) = \sum_{i,j} E_{pair}(r_i, r_j) + \dots + \sum_{i,j} E_{fix}(r_i) \quad (1)$$

prenant en compte l'énergie des interactions de paires, des liaisons et angles si présents, des

interactions *improper* ou *dihedral*, et des **fix** imposés lors de la minimisation (ex : ajout de contraintes, de forces appliquées sur les atomes, etc.).

Puis, la relaxation et la stabilisation utilisent un thermostat et barostat de Nosé–Hoover – c’est-à-dire dans l’ensemble canonique – pour atteindre les conditions physiques recherchées puis les stabiliser. Les quantités thermodynamiques lors de ces étapes sont typiquement celles des FIG. 8.



FIGURE 8 – Allures des grandeurs thermodynamiques pendant de la relaxation et la stabilisation (chaque étape a lieu en 100 000 `timesteps` soit 10 ps)

Enfin, la simulation principale se déroule avec un thermostat du même type – sans barostat cette fois – et avec une durée plus longue (≥ 1 ns) pour permettre l’équilibration du système (FIG. 9).

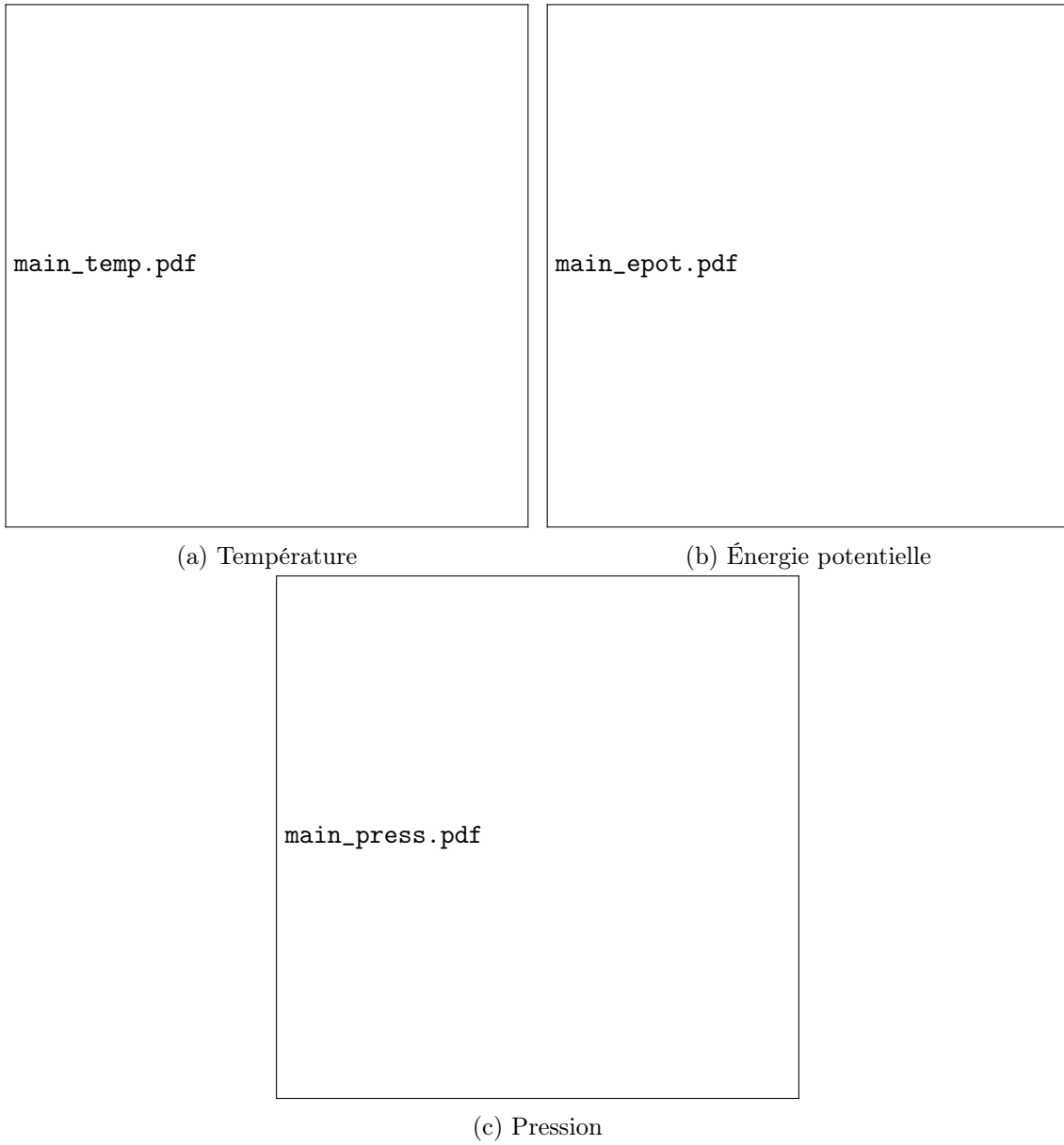


FIGURE 9 – Allures des grandeurs thermodynamiques pendant la simulation principale

2 Présentation des méthodes utilisées

3 Résultats et discussion

4 Conclusion

A Construction des configurations initiales avec *Packmol*

B Conversion des fichiers de configurations initiales au format *LAMMPS*

Références

- [1] Dr Fatih BIROL. “Key World Energy Statistics 2021”. In : ().
- [2] Cheng ZHONG et al. “A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors”. In : *Chemical Society Reviews* 44.21 (2015), p. 7484-7539. ISSN : 0306-0012, 1460-4744. DOI : 10.1039/C5CS00303B. URL : <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5CS00303B> (visité le 16/07/2023).
- [3] Zaharaddeen S. IRO, C. SUBRAMANI et S.S. DASH. “A Brief Review on Electrode Materials for Supercapacitor”. In : *International Journal of Electrochemical Science* 11.12 (déc. 2016), p. 10628-10643. ISSN : 14523981. DOI : 10.20964/2016.12.50. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1452398123179211> (visité le 17/07/2023).
- [4] Lei ZHANG et al. “A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications : A control/management perspective”. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (jan. 2018), p. 1868-1878. ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2017.05.283. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117309292> (visité le 05/07/2023).
- [5] Zheng BO et al. “Design of Supercapacitor Electrodes Using Molecular Dynamics Simulations”. In : *Nano-Micro Letters* 10.2 (avr. 2018), p. 33. ISSN : 2311-6706, 2150-5551. DOI : 10.1007/s40820-018-0188-2. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s40820-018-0188-2> (visité le 05/07/2023).
- [6] Adri C. T. VAN DUIN et al. “ReaxFF : A Reactive Force Field for Hydrocarbons”. In : *The Journal of Physical Chemistry A* 105.41 (1^{er} oct. 2001), p. 9396-9409. ISSN : 1089-5639, 1520-5215. DOI : 10.1021/jp004368u. URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp004368u> (visité le 05/07/2023).
- [7] Michael F. RUSSO et Adri C.T. van DUIN. “Atomistic-scale simulations of chemical reactions : Bridging from quantum chemistry to engineering”. In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms* 269.14 (juill. 2011), p. 1549-1554. ISSN : 0168583X. DOI : 10.1016/j.nimb.2010.12.053. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X10009869> (visité le 16/03/2023).
- [8] Thomas P. SENFTLE et al. “The ReaxFF reactive force-field : development, applications and future directions”. In : *npj Computational Materials* 2.1 (4 mars 2016). Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group, p. 1-14. ISSN : 2057-3960. DOI : 10.1038/npjcompumats.2015.11. URL : <https://www.nature.com/articles/npjcompumats201511> (visité le 16/03/2023).
- [9] Nicolas ONOFRIO et Alejandro STRACHAN. “Voltage equilibration for reactive atomistic simulations of electrochemical processes”. In : *The Journal of Chemical Physics* 143.5 (7 août 2015), p. 054109. ISSN : 0021-9606, 1089-7690. DOI : 10.1063/1.4927562. arXiv : 1504.03621[cond-mat]. URL : <http://arxiv.org/abs/1504.03621> (visité le 03/07/2023).
- [10] Koichi MOMMA et Fujio IZUMI. “VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data”. In : *Journal of Applied Crystallography* 44.6 (1^{er} déc. 2011), p. 1272-1276. ISSN : 0021-8898. DOI : 10.1107/S0021889811038970. URL : <https://scripts.iucr.org/cgi-bin/paper?S0021889811038970> (visité le 17/07/2023).
- [11] L. MARTÍNEZ et al. “PACKMOL : A package for building initial configurations for molecular dynamics simulations”. In : *Journal of Computational Chemistry* 30.13 (oct. 2009), p. 2157-2164. ISSN : 01928651, 1096987X. DOI : 10.1002/jcc.21224.

URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jcc.21224> (visité le 23/06/2023).