

Propriétés diélectriques de polymères haute performance pour des applications lunaires

par

Félix LEBLANC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 12 AVRIL 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Félix Leblanc, 2021



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Éric David, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Nicole Demarquette, présidente du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Martine Dubé, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Marie-Josée Potvin, membre du jury
Agence spatiale canadienne

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 26 MARS 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon directeur de recherche Éric David de m'avoir guidé tout au long de ma maîtrise. Merci de m'avoir permis de faire partie de ce projet. Votre confiance, vos connaissances et votre expérience ont été d'une aide inestimable pendant près de deux ans de recherche.

Un grand merci aussi à Marie-Josée Potvin et aux autres membres de l'Agence spatiale canadienne. Les rencontres bimensuelles ont été à la fois structurantes et enrichissantes. Elles m'ont permis de demeurer motivé en tout temps et ce, même pendant les périodes plus difficiles.

Merci aux autres étudiants de l'ETS et du groupe CREPEC qui m'ont aidé ou conseillé à de nombreuses occasions.

Merci aux professeurs du regroupement stratégique CREPEC de faire confiance aux étudiants du programme Vision, en leur procurant un soutien financier. Cela permet à tous les étudiants du groupe d'avoir accès au temps de laboratoire indispensable à la poursuite des recherches.

Merci aussi à Nabil Mazeghrane, ainsi qu'à tous les autres techniciens de laboratoire de l'ETS, pour votre patience, votre temps et votre aide pendant les manipulations en laboratoire.

Je me dois de mentionner ma famille et mon amoureuse qui m'ont toujours appuyé dans tous mes projets. Votre appui m'a permis de me réaliser à bien des niveaux. Un merci spécial à ma mère qui m'a toujours aidé et encouragé dans mes études.

Finalement, merci à tous les enseignants qui m'ont soutenu tout au long de mon cheminement académique.

Propriétés diélectriques de polymères haute performance pour des applications lunaires

Félix LEBLANC

RÉSUMÉ

Pour atteindre de nouveaux horizons, plusieurs équipes de par le monde cherchent à améliorer les engins d'exploration spatiale. Au Québec, le groupe CREPEC Vision se consacre au développement d'un prototype de rover lunaire doté d'un châssis en composite de polymères thermoplastiques. Ce choix de matériaux permettrait de fabriquer le châssis par impression 3D, en plus d'ouvrir la porte aux réparations en cours de mission. Cependant, les polymères ne dispersent pas aussi bien les charges présentes dans l'environnement lunaire que l'aluminium employé actuellement. Les radiations présentes dans l'environnement lunaire induisent des charges qui peuvent déclencher des décharges électrostatiques dommageables pour l'électronique fragile. Il faut donc découvrir un moyen d'augmenter la protection offerte par les polymères haute performance que l'équipe compte utiliser, soit le PEEK et le PEI.

L'objectif de ce mémoire consiste précisément à trouver le meilleur additif pour augmenter la conductivité de ces polymères au-dessus du seuil de $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ et ainsi faire en sorte que les charges seront dissipées.

Pour y arriver, des échantillons composés d'un des deux polymères avec un des trois additifs (noir de carbone, graphène ou fibres de carbone) sont fabriqués à différentes concentrations à l'aide d'une micro-extrudeuse. Puis, les propriétés diélectriques sont mesurées à l'aide de la spectroscopie diélectrique à large bande à des températures allant de 25 °C à 200 °C, de façon à englober les températures diurnes de l'environnement lunaire qui peuvent atteindre 120 °C.

Tant pour le PEEK que pour le PEI, l'analyse des résultats montre que le meilleur additif, parmi les trois testés, est le noir de carbone. De fait, c'est celui qui génère le seuil de percolation le plus bas (12 % massique), en plus de procurer la plus grande conductivité (plus de $10^{-8} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) aux polymères haute performance.

Mots-clés : PEI, PEEK, radiation, Lune, conductivité, rover, noir de carbone, graphène

Dielectric Properties of High-performance Polymers for Lunar Applications

Félix LEBLANC

ABSTRACT

To reach new horizons, several teams around the world are looking to improve technologies used in spacecraft. In Quebec, the CREPEC Vision group is dedicated to the development of a lunar rover prototype built with a thermoplastic composite chassis. This choice of materials allows manufacturing the chassis by 3D printing, in addition to opening the door to repairs during the missions. However, polymers do not disperse the charges present in the lunar environment as well as the aluminum currently used. Radiation in the lunar environment induces charges that can trigger electrostatic discharges that are damaging to fragile electronics. Therefore, a way must be founded to increase the protection offered by the high-performance polymers that the team intends to use, namely PEEK and PEI.

The objective of this thesis is to discover the best additive to increase the conductivity of these polymers above the threshold of $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ and thus ensure that the charges will be dissipated.

To achieve this, samples composed of one of the two polymers with one of three additives (carbon black, graphene or carbon fibers) are made at different concentrations using a micro-extruder. Then, the dielectric properties are measured using broadband dielectric spectroscopy at temperatures ranging from 25°C to 200°C , to encompass the range of daytime temperatures of the lunar environment which can reach 120°C .

For both PEEK and PEI, analysis of the results shows that the best additive, of the three tested, is carbon black. In fact, it is the one that generates the lowest percolation threshold (12 % by mass), in addition to procuring the highest conductivity (more than $10^{-8} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) for high performance polymers.

Keywords: PEEK, PEI, radiation, Moon, conductivity, rover, carbon black, graphene

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DES CONNAISSANCES ACTUELLES.....	3
1.1 L'environnement lunaire.....	3
1.1.1 L'atmosphère	3
1.1.2 Température	4
1.1.3 Radiations	5
1.1.3.1 Rayonnement galactique.....	6
1.1.3.2 Rayonnement solaire.....	7
1.1.4 Le régolithe	10
1.2 Caractéristiques recherchées pour les matériaux	11
1.2.1 Conductivité électrique (σ)	11
1.2.1.1 Point de percolation	13
1.2.2 Conductivité thermique.....	14
1.3 Matériaux à l'étude	15
1.3.1 Polymères.....	15
1.3.1.1 Polyétherimide (PEI)	15
1.3.1.2 PEEK.....	17
1.3.2 Additifs	18
1.3.2.1 Noir de carbone (NDC).....	18
1.3.2.2 Graphène (GN).....	19
1.3.2.3 Fibres de carbone (FC).....	20
1.4 Polymères existants.....	20
1.4.1 Différents polymères avec du graphène ou du NDC	20
1.4.2 Différents polymères avec du graphène.....	22
1.4.3 Composites de PEI avec des nanofibres de carbone (NFC)	24
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	27
2.1 Séchage du polymère	27
2.2 Mélanges avec le noir de carbone	28
2.3 Mélanges avec le GN	31
2.4 Traitement pour le PEI avec fibre de carbone	31
2.5 Mise en forme des échantillons.....	31
2.6 Plaquage	32
2.7 Tests de conductivité à hautes températures	33
2.8 Tests de conductivité à basses températures	34
2.9 Microscopie électronique à balayage (MEB)	34
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSES	35
3.1 PEI pur	35
3.2 PEEK pur	37

3.3	PEI-NDC.....	39
3.4	PEEK-NDC.....	44
3.5	PEI-FC	50
3.6	PEEK-GN	51
3.7	Comparaison entre les différents mélanges	54
3.8	Causes d'erreur	56
	CONCLUSION.....	59
	RECOMMANDATIONS	61
ANNEXE I	MASSE DES ÉCHANTILLONS RÉALISÉS.....	63
ANNEXE II	CALCUL DE LA CONCENTRATION DE FIBRE DE CARBONE DANS LE PEI.....	65
ANNEXE III	PHOTOS PRISES AVEC LA MEB D'ÉCHANTILLONS DE PEI-NDC	67
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	73

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Flux en fonction de l'énergie des particules provenant de la radiation galactique Tirée de Townsend (2005, p. 46)	7
Figure 1.2	Activité du Soleil de 1997 à 2021.....	8
Figure 1.3	Interactions des radiations avec la surface d'un vaisseau spatial Tirée de Garrett & Whittlesey (2012, p. 9).....	9
Figure 1.4	Graphique du seuil de percolation Tirée de Marsden et al. (2018, p. 5)....	14
Figure 1.5	Structure du PEI <i>Ultem</i> série 1000.....	16
Figure 1.6	Structure du PEEK Tirée de Yang et al. (2017, p. 118).....	17
Figure 1.7	Photographie réalisée par microscopie électronique de quelques agglomérats de noir de carbone Tirée de CARBON (2014).....	18
Figure 1.8	Graphique de la conductivité selon la concentration de GN pour différents mélanges de polymères Tirée de Kurusu et al. (2018, p. 4)	23
Figure 2.1	Mélangeur interne utilisé pour faire les mélanges maîtres	28
Figure 2.2	Mélange maître déchiqueté de PEI avec 15 % de NC	29
Figure 2.3	Intérieur de la micro-extrudeuse	30
Figure 2.4	Échantillon de PEEK-GN 8 % plaqué	32
Figure 2.5	Support pour le test de conductivité.....	33
Figure 3.1	Pertes diélectriques (ϵ'') et conductivité complexe (σ') du PEI à 25 °C en fonction de la fréquence.....	36
Figure 3.2	Conductivité d'un échantillon de PEI pur selon la fréquence, avant et après séchage	37
Figure 3.3	Pertes diélectriques (ϵ'') et conductivité complexe (σ') du PEEK à 25 °C en fonction de la fréquence	38

Figure 3.4	Conductivité des échantillons de PEI-NDC selon la fréquence à 25 °C....	39
Figure 3.5	Conductivité des échantillons de PEI-NDC selon la fréquence à 100 °C..	40
Figure 3.6	Conductivité des échantillons de PEI-NDC selon la concentration de noir de carbone à 3 températures différentes.	41
Figure 3.7	Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC à 6 % massique.....	43
Figure 3.8	Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC à 10 % massique.....	43
Figure 3.9	Conductivité des échantillons de PEEK-NDC selon la fréquence à 25 °C	45
Figure 3.10	Conductivité des échantillons de PEEK-NDC selon la fréquence à 100 °C.....	46
Figure 3.11	Conductivité des échantillons de PEEK-NDC selon la concentration de noir de carbone à 3 températures différentes	47
Figure 3.12	Permittivité imaginaire d'un échantillon de PEEK-NDC 8 % de -100 °C à 200 °C	48
Figure 3.13	Conductivité d'un échantillon de PEEK-NDC 8 % de -100 °C à 200 °C	49
Figure 3.14	Conductivité des échantillons de PEI-FC selon la fréquence à 100 °C	50
Figure 3.15	Conductivité des échantillons de PEEK-GN selon la fréquence à 25 °C.....	51
Figure 3.16	Conductivité des échantillons de PEEK-GN selon la fréquence à 100 °C.....	52
Figure 3.17	Conductivité des échantillons de PEEK-GN selon la concentration de graphène à 3 températures différentes	53
Figure 3.18	Conductivité des différents types d'échantillons selon la concentration massique d'additif à une fréquence de 0,1 Hz et à 100 °C	55

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BDS	Spectroscopie diélectrique à large bande (Broadband Dielectric Spectroscopy)
CREPEC	Centre de recherche sur les systèmes polymères et composites à haute performance
EVA	Éthylène-acétate de vinyle
FC	Fibre de carbone (Carbon Fiber)
FRQNT	Fonds de recherche Nature et technologies
GN	Graphène (Graphene)
LLDPE	Polyéthylène basse densité linéaire (Linear low-density polyethylene)
MEB	Microscopie électronique à balayage
NDC	Noir de Carbone (Carbon Black)
NFC	Nanofibre de carbone (Carbon NanoFiber)
PCP	Partie par centaine de polymères
PEEK	Polyétheréthercétone
PEI	Polyétherimide
Tg	Température de transition vitreuse
UV	Ultraviolet

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

m	mètre (unité de longueur)
kg	kilogramme (unité de masse)
s	seconde (unité de temps)
°C	degré Celsius (unité de température)

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

cm	centimètre
mm	millimètre
µm	micromètre
nm	nanomètre

UNITÉS DE TEMPS

h	heure
min	minute
s	seconde

UNITÉS DE PRESSION

MPa	mégapascal
Pa	pascal
bar	bar

UNITÉS ÉLECTRIQUE

Conductivité

$S \cdot m^{-1}$	siemens par mètre
$(\Omega \cdot m)^{-1}$	inverse de ohm mètre

Énergie

eV/n	électron volt par nucléon
------	---------------------------

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, l'intérêt pour l'exploration spatiale regagne en popularité au sein des grandes nations. L'engouement pour la planète rouge, avec l'objectif d'envoyer des gens sur Mars d'ici une ou deux décennies, est au cœur de cette relance. Cependant, pour pouvoir aller plus loin dans notre système solaire, il est primordial de mieux connaître la Lune. Une station lunaire est importante pour des explorations plus éloignées. Ce milieu est aussi l'endroit tout désigné pour tester les technologies nécessaires aux autres missions. La première étape consiste donc à recueillir davantage de données sur la Lune, et le meilleur moyen pour y arriver est d'envoyer des outils de mesures sur cet astre.

Le Centre de recherche sur les systèmes polymères et composites à haute performance (CREPEC) a accordé son aide financière au projet Vision, dont l'objectif est d'élaborer la recherche pour ultimement permettre l'envoi d'un rover avec un châssis composé de polymères thermoplastiques sur la Lune. Il y aurait de nombreux avantages à utiliser ces matériaux dans la conception d'un rover. Celui-ci serait plus léger ainsi que plus facile à réparer. En revanche, les composantes en aluminium des rovers actuels sont conductrices, ce qui évite les accumulations de charges que l'environnement lunaire peut entraîner. Les polymères sont malheureusement des isolants électriques, ce qui pourrait causer des accumulations de charges menant à des décharges électrostatiques pouvant endommager le rover.

Le mémoire actuel contribue à une partie de la recherche effectuée par ce groupe. L'objectif de la présente étude est de trouver le type et la concentration d'additif nécessaire (entre le noir de carbone, le graphène ou les fibres de carbone) à des polymères haute performance (PEEK et PEI), afin qu'ils atteignent une conductivité électrique au-dessus d'un seuil fixé à $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. En augmentant la conductivité des polymères, il sera possible d'éviter l'accumulation de charges et, ainsi, de protéger les composantes internes de décharges électrostatiques.

Le groupe CREPEC Vision souhaite pouvoir imprimer, grâce à la fabrication additive, la majorité du châssis sur un panneau sandwich qui permettrait de solidifier le rover. Le meilleur mélange identifié dans le cadre de ce mémoire pourrait être imprimé sur les dernières couches du châssis ou à d'autres endroits stratégiques, de façon à créer un réseau assez conducteur pour éviter les trop grandes différences de charges, protégeant ainsi les composants plus fragiles des décharges électrostatiques.

Ce mémoire est divisé en différentes sections : le premier chapitre est composé de la revue de la littérature sur les sujets permettant une bonne compréhension du problème, ainsi que sur les mélanges semblables réalisés par d'autres chercheurs. Le deuxième chapitre expose la méthode utilisée et justifie la démarche méthodologique. Le troisième chapitre traite des résultats obtenus et présente une analyse de ces derniers. Une conclusion ainsi que des recommandations viennent boucler ce mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DES CONNAISSANCES ACTUELLES

Ce premier chapitre présente une revue de la littérature ainsi que des connaissances nécessaires pour bien comprendre le point de départ de ce mémoire ainsi que ses enjeux. L'environnement lunaire, les caractéristiques recherchées, les différents polymères et additifs qui seront utilisés ainsi que différents mélanges comparables seront présentés dans ce chapitre.

1.1 L'environnement lunaire

L'objectif du groupe CREPEC Vision, dont fait partie cette étude, est de construire un prototype de rover lunaire. Pour bien comprendre les différentes implications, il faut connaître l'environnement à la surface de la Lune qui est un milieu très aride et difficile. Les principaux facteurs environnementaux seront abordés plus en détail dans leur sous-section respective. Ceux-ci seront presque tous abordés, à l'exception de la faible gravité qui n'a aucun impact sur les caractéristiques des matériaux recherchées.

1.1.1 L'atmosphère

Contrairement à la croyance populaire, la Lune possède une atmosphère. Elle est principalement composée de néon, d'hydrogène, d'hélium et d'argon. À sa surface, la pression est de $3 \cdot 10^{-15}$ bar pour la nuit et est encore plus faible le jour (« Moon Fact Sheet », s.d.). Cette très faible pression peut être considérée comme nulle dans la majorité des applications, ce qui est le cas présent. C'est pour cette raison que plusieurs personnes pensent que cet astre n'a aucune atmosphère. Cette faible atmosphère n'offre pas vraiment de protection contre les radiations, ce qui cause de nombreux effets pour les matériaux diélectriques. Plus de détails sont donnés dans la section 1.1.3 sur les radiations.

Deux phénomènes causés par le « vide » sont le dégazage ainsi que le dégagement de la matière. Le dégagement est le phénomène où un gaz est libéré d'un matériau, par exemple de l'azote qui s'échappe d'un polymère, tandis que le dégazage est le phénomène qui se produit lorsqu'une partie de la matière solide est sublimée ou évaporée. Ces deux phénomènes causent une perte de masse du matériau. Cela est particulièrement critique pour les polymères, parce que ceux-ci sont habituellement plus sensibles à ces phénomènes que les métaux (Chiggiato, s.d.). Une fois qu'un matériau est dégazé, ses propriétés peuvent être altérées, particulièrement lorsque la masse perdue est grande. De plus, le matériel, qui est maintenant sous forme gazeuse, peut se reformer et recouvrir les autres surfaces, ce qui peut altérer les capteurs par exemple.

1.1.2 Température

La température à la surface de la Lune varie grandement. En effet, elle peut aller d'environ -150 °C à 120 °C à l'équateur. Les températures le jour varient beaucoup selon la longitude qui définit l'angle dans lequel les rayons du Soleil frappent le sol (« Lunar Temperature - Lunarpedia », s.d.). La période de rotation de la Lune est d'environ 28 jours (« Moon Fact Sheet », s.d.), ce qui veut dire que la nuit dure l'équivalent de 14 jours terrestres. Pendant cette période, la température diminue en fonction de la chaleur qui irradie du sol lunaire. Le froid est donc plus intense juste avant le lever du jour.

La nuit, lorsque les températures sont glaciales, les matériaux peuvent devenir très fragiles, tandis que le jour, lorsque la chaleur est intense, les matériaux peuvent ramollir. En raison de la faible masse de l'atmosphère, les températures varient rapidement, soit d'environ 5 °C/h à l'aurore et au crépuscule, ce qui peut induire un stress thermique dans les matériaux.

Finalement, certaines composantes internes, telles que les capteurs et la batterie, doivent rester à environ 20 °C. Il est nécessaire de les isoler des échanges thermiques avec l'extérieur en tout temps pour assurer leur bon fonctionnement.

1.1.3 Radiations

Les radiations cosmiques frappent la surface de la Lune avec beaucoup plus d'intensité que la surface de la Terre. Cela est dû à deux principales causes : la faible atmosphère lunaire ainsi que son faible champ magnétique. Le rayonnement est le « Transport d'énergie sous la forme d'ondes ou de particules à partir d'une source [...]» (Larousse, s.d.). Toutes les ondes et particules qui voyagent dans l'espace rentrent dans ces critères, c'est pour cela que la radiation sera sous-divisée dans la section suivante. Les principales sources de radiation sur la Lune sont le Soleil et les astres hors de notre système solaire. Avant de voir les différents types de radiations sur la Lune, il y a lieu de rappeler quelques notions générales importantes.

La majorité des particules des radiations spatiales se présentent sous forme de plasma, qui est un état de la matière semblable au gaz. Cependant, il est tellement chaud que les électrons flottent librement détachés de leur noyau.

L'énergie cinétique que possèdent les particules est mesurée en électrons Volt (eV). Cette énergie est la même que celle qu'aurait la particule si elle était propulsée grâce à un potentiel électrique de cette intensité. L'énergie cinétique d'une particule est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1.1)$$

où E est l'énergie, m la masse de la particule et v la vitesse de celle-ci. Cette formule illustre bien la dynamique des particules dans un plasma où l'énergie est bien répartie. Avec la même énergie, la vitesse d'un proton est plus lente que celle d'un électron à cause de leur différence de masse (un proton est environ 1836 fois plus massif qu'un électron) (Garrett & Whittlesey, 2012).

1.1.3.1 Rayonnement galactique

Le rayonnement galactique est un flot de particules provenant de l'extérieur de notre système solaire. Ce flux est plutôt constant et varie faiblement selon l'activité de notre Soleil. Lorsque l'activité du Soleil est plus intense, il bloque une plus grande partie de ces radiations, particulièrement celles de faible intensité énergétique (moins de quelques GeV par nucléon). Il est donc possible d'avoir une bonne idée de cette intensité en se basant sur les cycles du Soleil qui s'étalent sur une période de 11 ans. Ce rayonnement est composé à 88 % de protons (noyaux d'hydrogène), 10 % de particules alpha (noyaux d'hélium), 2 % de particules lourdes (noyaux de carbone, d'oxygène, azote, bore, lithium, phosphore, fer, nickel et béryllium) (Townsend, 2005). Les particules possèdent de grandes quantités d'énergie, on peut voir la distribution du flux des particules en fonction de l'énergie de ses dernières à la Figure 1.1. Grâce à sa puissance, le rayonnement galactique peut pénétrer facilement la matière. Conséquemment, il est difficile de se protéger de celui-ci (Adams, Silberberg, & Tsao, 1981).

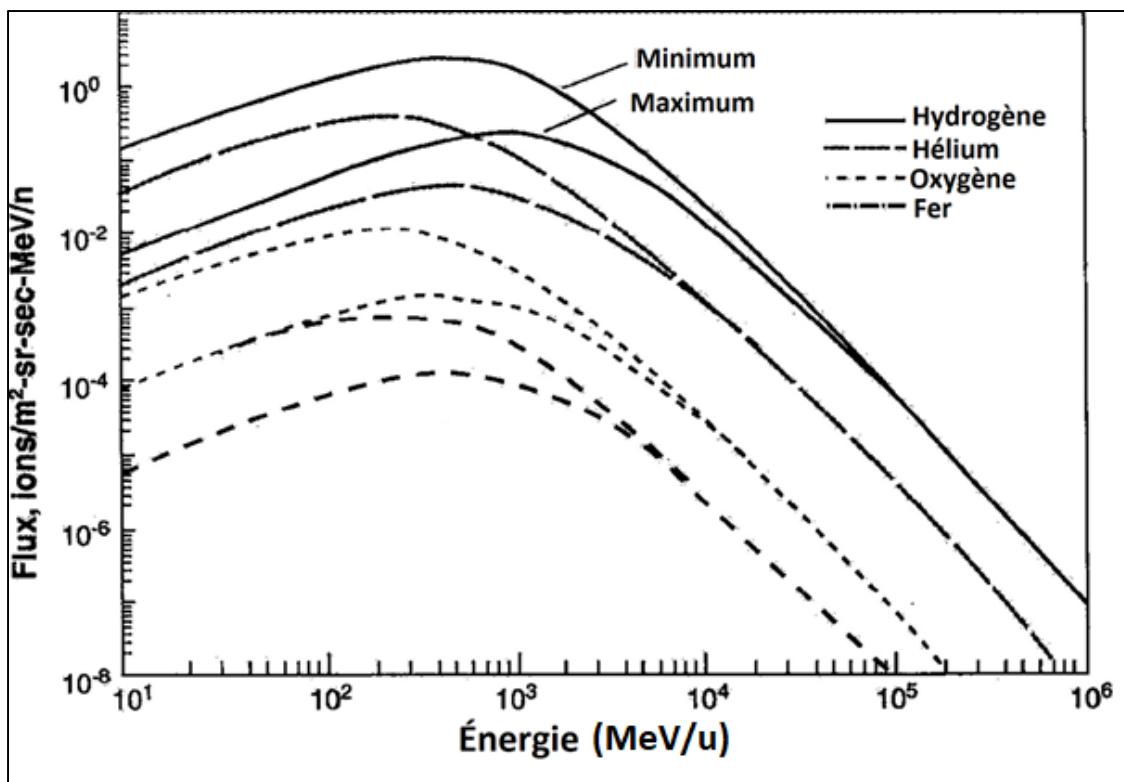


Figure 1.1 Flux en fonction de l'énergie des particules provenant de la radiation galactique

Tirée de (Townsend, 2005)

Les deux axes du graphique ci-dessus sont logarithmiques. La variation de flux des différents éléments causée par l'activité du Soleil ainsi que la courbe de répartition des particules selon leur énergie sont visibles.

1.1.3.2 Rayonnement solaire

Pour ce qui est du rayonnement solaire, il peut également être sous-divisé en deux catégories : celui causé par le vent solaire et celui engendré par les éruptions solaires. Le vent solaire est assez prévisible, c'est le cycle sur 11 ans mentionné plus haut. Cependant, les éruptions solaires ainsi que leur intensité sont beaucoup plus difficiles à prévoir.

Chaque type de rayonnement solaire comprend des ondes électromagnétiques (la bande radio, la plage visible, un rayonnement X et un rayonnement gamma) ainsi qu'un flot de particules sous forme de plasma. Les particules du vent solaire ont une énergie plutôt faible, environ 1 keV/u. Celles causées par les éruptions solaires peuvent être beaucoup plus énergétiques, voire s'élever à quelques MeV/u pour les tempêtes majeures. Le flux de particules dépend grandement de l'activité du Soleil. Celle-ci est mesurée à l'aide du nombre de taches solaires ainsi que du nombre d'éruptions à sa surface. Les éruptions solaires sont classées en fonction l'intensité de leur rayonnement (rayons X de longueur d'onde entre 0,1 et 0,8 nm). Celle-ci est calculée en watt par mètre carré (W/m²). Cinq catégories existent, désignées par les lettres A, B, C, M et X. Chaque catégorie correspond à une éruption 10 fois plus puissante que la précédente, à l'exception de la catégorie X qui englobe toutes les éruptions plus fortes que celle de la catégorie M (Cannat, 2014). L'activité du Soleil de 1997 à 2021 est visible sur la Figure 1.2 ci-dessous.

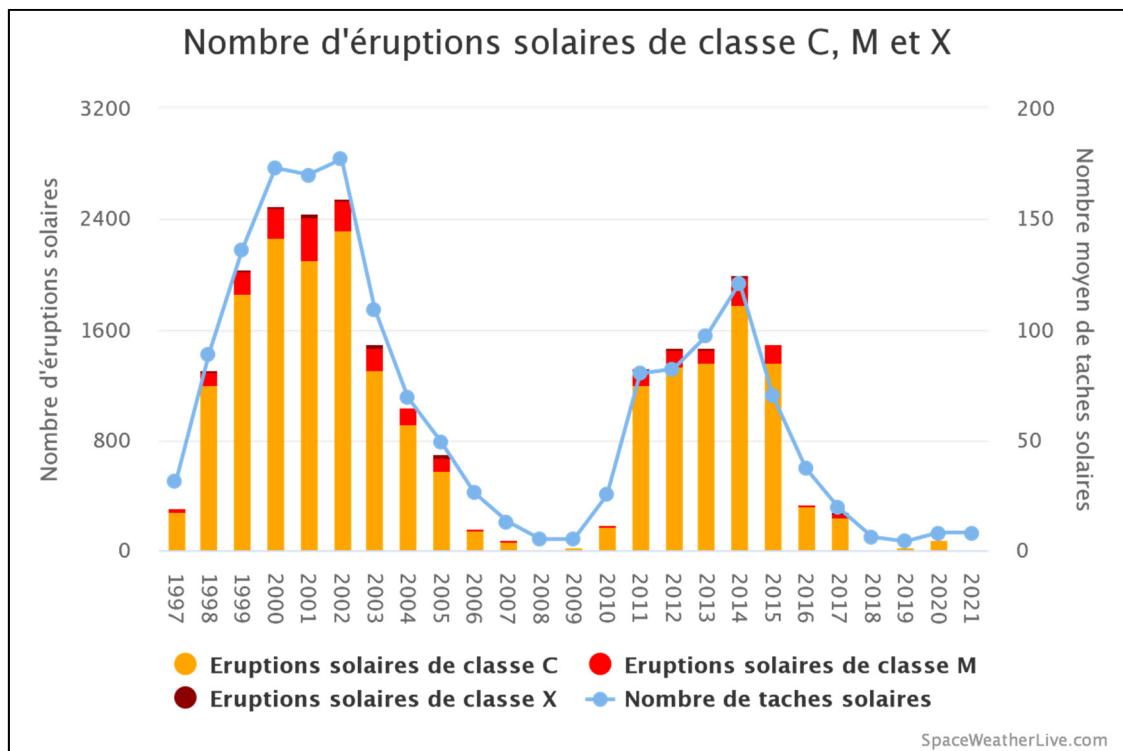


Figure 1.2 Activité du Soleil de 1997 à 2021

Tirée de « Progression du cycle solaire | Activité solaire » (2021)

Ce graphique montre bien la variation d'activité du Soleil tout au long de son cycle. Lorsque le moment de la mission du rover aura été déterminé, il sera important de tenir compte de celui-ci pour le design du rover, particulièrement en ce qui a trait à la protection aux radiations.

Le rayonnement peut endommager l'équipement de multiples manières. Celui-ci peut créer des différences de potentiel entre diverses composantes ou même à l'intérieur d'un matériau isolant. Selon leur exposition au rayonnement, les matériaux diélectriques peuvent se charger de façon non uniforme. Les matériaux conducteurs eux, se chargent uniformément, car les électrons peuvent se déplacer plus facilement dans ces matériaux. Il arrive donc qu'aux interfaces, les différences de charges deviennent assez grandes pour créer des arcs qui peuvent endommager la matière et particulièrement les circuits électriques présents dans un engin spatial (Griseri, 2009). Les différentes interactions entre les radiations et la surface d'un engin spatial sont illustrées à la Figure 1.3.

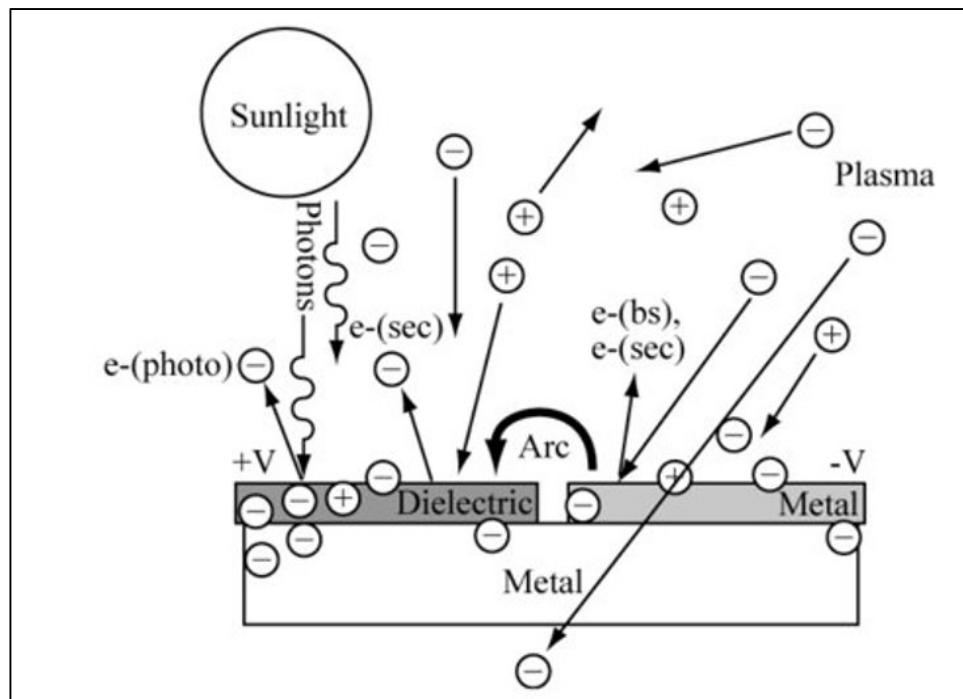


Figure 1.3 Interactions des radiations avec la surface
d'un vaisseau spatial
Tirée de (Garrett & Whittlesey, 2012)

Cette figure illustre ce qui passe à la surface d'un vaisseau : ce sont habituellement les particules avec une énergie variant de 0 à 50 keV qui interagissent avec la surface. Les particules avec une plus grande énergie (de 100 keV à environ 3 MeV) peuvent avoir ces interactions à l'intérieur du vaisseau, car les radiations avec une plus grande énergie traversent plus de matière avant d'être arrêtées (Garrett & Whittlesey, 2012), ces dernières vont donc interagir avec la surface de la Lune.

Tous les types de radiations, en plus de charger directement le rover, vont charger le sol ainsi que la faible atmosphère créant ainsi un environnement électrodynamique très complexe. La surface est habituellement chargée positivement au soleil et négativement à l'ombre (Halekas et al., 2007). Toutes ces charges dans l'environnement lunaire sont causées par les radiations, et ces charges influencent les charges du rover. En bref, les radiations sont une double menace, car elles influencent les charges des matériaux directement et indirectement par l'environnement. Pour citer Bedingfield et ses collègues qui ont signé un papier de la NASA : « L'enregistrement des anomalies et des pannes sur toutes les missions précédentes d'engins spatiaux montre de manière concluante que les charges et décharges électrostatiques sont la principale cause environnementale d'anomalies et de pannes dans l'espace. » (Bedingfield et al., 1996). C'est pour cette raison que ce mémoire est centré sur cet effet causé par les radiations ainsi que sur les moyens de s'en protéger.

1.1.4 Le régolithe

La surface de la Lune est composée de roche et de poussière créée par les nombreux impacts de météorites. La composition du sol est semblable à la cendre volcanique présente sur Terre. Les particules de moins de 100 µm sont classées comme étant de la poussière (invisible à l'œil nu). La taille moyenne de celle-ci est de 70 µm, mais certaines particules peuvent être beaucoup plus petites, puisque des grains de 10 nm ont été observés. La forme des grains est extrêmement variable, certains sont sphériques alors que d'autres sont irréguliers. Cependant, la majorité possède une forme allongée (Stubbs, Vondrak, & Farrell, s.d.).

La poussière est la source de nombreuses difficultés lors des missions d'explorations lunaires. Puisqu'elle est chargée électriquement, elle adhère à toutes les surfaces. Ceci est causé par la faible conductivité du régolithe, les grains gardent donc leur charge electrostatique. La charge de la poussière est plus importante le jour, à cause de la température plus élevée et à cause des radiations ultra-violettes et infrarouges qui sont plus fortes.

Le fait que la poussière adhère à toutes les surfaces ne serait pas un problème particulièrement grave si celle-ci ne possédait pas ses autres propriétés. En effet, la poussière est très dure et abrasive. Les grains peuvent être irréguliers et pointus. Ils s'accrochent donc de façon mécanique, en plus d'avoir l'adhésion causée par les charges électrostatiques. À cause de la très petite taille de ceux-ci, ils peuvent entrer dans le moindre orifice. La poussière vient endommager la surface des équipements, ainsi que les joints ou les systèmes mécaniques, ce qui réduit grandement la durée de vie du matériel. La charge électrique du rover vient donc jouer un rôle important, si celui-ci est chargé comme le régolithe. La poussière sera moins attirée et donc endommagera moins le matériel.

1.2 Caractéristiques recherchées pour les matériaux

Le but des expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire consiste à trouver des mélanges de polymères qui protègeraient le matériel des radiations, particulièrement des accumulations de charges qui peuvent en découler. Ce qui soulève la question suivante : quelles sont les caractéristiques souhaitées ?

1.2.1 Conductivité électrique (σ)

Il existe trois mécanismes permettant de se protéger des ondes électromagnétiques : la réflexion, l'absorption et les réflexions multiples (Jan et al., 2017). La conductivité, qui est la capacité d'un matériau à conduire des charges, est la caractéristique ayant l'influence la plus importante sur ces mécanismes. Plus un matériau est conducteur, plus les électrons peuvent se déplacer avec facilité entre les atomes et les molécules. En plus de protéger des ondes électromagnétiques, un matériau conducteur permet de dissiper les charges induites par

l'environnement lunaire. Étant donné que le sol est isolant, il est impossible de faire une mise à la terre, cependant il est important que les charges à l'intérieur du rover soient toutes au même niveau pour éviter les décharges. C'est donc la caractéristique la plus importante pour un matériau servant à protéger des radiations. De plus, la conductivité permet de dissiper les charges induites par l'environnement.

La conductivité est l'inverse de la résistivité volumique, car elle est indépendante de la forme et de la taille de la matière dans laquelle circulent les électrons. L'unité de la conductivité dans le système international est le $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ (siemens par mètre), ce qui équivaut à $(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ l'inverse d'un ohm mètre.

La conductivité complexe (σ^*) est mesurée à l'aide des mêmes unités. Elle dépend de la conductivité, de la permittivité complexe du matériau ainsi que de la fréquence d'excitation (Kremer & Schönhals, 2002). La partie réelle de la conductivité complexe est donnée par :

$$\sigma'(\omega) = \sigma + \omega\epsilon_0\epsilon''(\omega) \quad (1.2)$$

où σ est la conductivité, ω est la fréquence angulaire de l'excitation électrique, ϵ_0 est la permittivité du vide et ϵ'' est la partie imaginaire de la permittivité relative reliée aux mécanismes de pertes diélectriques autres que ceux dus à la conductivité. Lorsqu'un matériau est légèrement conducteur, à basse fréquence, le premier terme du membre de droite de l'équation ci-dessus est dominant et la partie réelle de la conductivité complexe correspond à la conductivité. Cela est visible dans plusieurs graphiques des résultats, le premier étant la Figure 3.4. C'est de cette façon que sera principalement mesurée la conductivité dans le cadre de ce travail.

Certains autres facteurs influencent la conductivité. Par exemple, la lumière ainsi que la température sont des facteurs importants, variant avec le temps sur la Lune. La lumière peut causer la dégradation des chaînes des polymères et ainsi accélérer le vieillissement de ceux-ci. La température a un impact sur la partie réelle de la conductivité complexe. Il est primordial

de saisir leurs impacts, de manière à ce que le châssis du rover puisse protéger les composantes en fonction des valeurs de conductivité prévues.

Pour éviter les accumulations de charge et prévenir les décharges électrostatiques, une résistance volumique de $\rho < 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ doit être choisie (Griserie, 2009), ce qui équivaut à une conductivité de $10^{-11} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Cette valeur de conductivité est recommandée pour les satellites terrestres, malheureusement la recherche documentaire n'a pas permis d'identifier une valeur spécifique aux rovers lunaires. Cependant, la distance avec le Soleil, la faible protection offerte par l'atmosphère et le champ magnétique sont semblables pour un satellite en très haute orbite et pour un rover sur la Lune. La valeur pour les satellites terrestres sous-estime probablement le besoin réel de conductivité sur la Lune, étant donné les charges présentes dans l'environnement. Celle-ci permet toutefois d'avoir une cible concrète.

1.2.1.1 Point de percolation

La percolation est un processus physique qui indique le changement d'état de la matière. Pour la conductivité électrique, c'est une concentration critique d'un additif qui permet le passage des électrons. Lorsqu'on atteint ce point, la conductivité augmente rapidement jusqu'à atteindre un nouveau plateau, tel qu'illustré à la Figure 1.4.

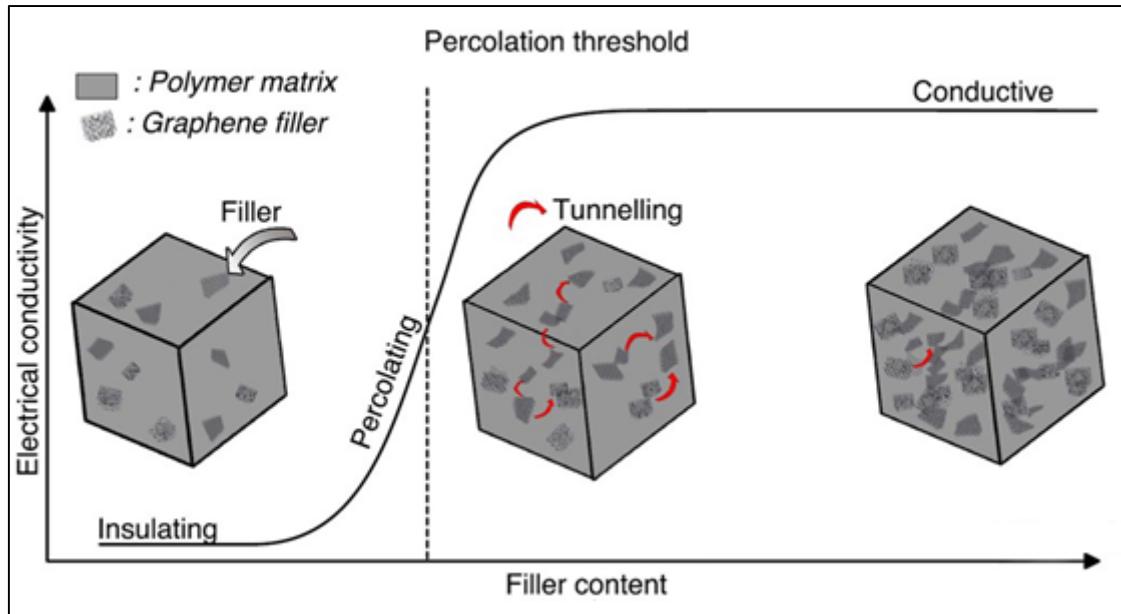


Figure 1.4 Graphique du seuil de percolation
Tirée de (Marsden et al., 2018a)

Dans la Figure 1.4, l'axe vertical représente la conductivité électrique, tandis que l'abscisse représente la concentration d'additif conducteur. Il s'agit ici de graphène dans un polymère quelconque. Plus la différence de conductivité entre la matrice et l'additif est grande, plus le gain sera conséquent. Le point de percolation est pertinent dans le cas présent, car c'est la concentration minimale d'additif où la conduction augmente drastiquement. Surcharger le polymère d'additif après ce point n'a que peu d'impact sur la conductivité du mélange, il est alors peu souhaitable de continuer à modifier les caractéristiques mécaniques du matériau.

1.2.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Habituellement, lorsqu'un matériau est un bon conducteur électrique, il est aussi un bon conducteur thermique, ce qui peut constituer un inconvénient dans un environnement comme celui sur la Lune, car pendant les longues nuits excessivement froides, les composantes internes du rover doivent garder une certaine chaleur, donc être protégées des pertes de chaleur par radiation. À ce point de vue, augmenter la conductivité électrique d'un polymère peut être une

épée à double tranchant. Pour bien protéger l'intérieur du rover des radiations et des conditions thermiques extrêmes, l'équipe responsable de la conception devra faire preuve d'ingéniosité en utilisant différents mélanges, avec des caractéristiques bien précises, à des endroits stratégiques sur le châssis.

1.3 Matériaux à l'étude

Dans la section suivante, les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans les mélanges étudiés seront expliquées. De plus, la justification des choix de matériaux sera présentée.

1.3.1 Polymères

Dans un premier temps, les deux polymères choisis pour la réalisation des échantillons, le PEI et le PEEK, seront présentés. L'équipe se devait de choisir des thermoplastiques, car les polymères de cette catégorie ramollissent lorsqu'ils sont chauffés. Cela ouvre la porte au développement de techniques de réparation en cours d'opération, en plus de permettre la construction du châssis grâce à la fabrication additive.

1.3.1.1 Polyétherimide (PEI)

Le PEI a été choisi par l'équipe de CREPEC Vision, car il s'agit d'un thermoplastique amorphe de haute performance. Le PEI possède aussi de nombreuses propriétés qui en font un candidat idéal pour la conception de rover. Celui-ci contient des liaisons éthers et des groupes imides dans sa chaîne polymère, qu'on peut apercevoir à la Figure 1.5.

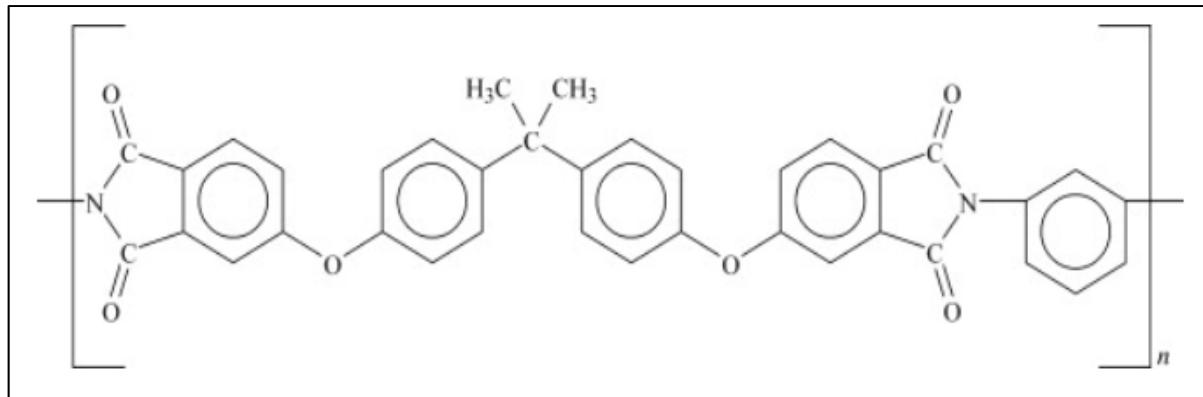


Figure 1.5 Structure du PEI *Ultem* série 1000

Sa température de transition vitreuse est élevée ($T_g \sim 216\text{--}220^\circ\text{C}$) (« Unfilled PEI :: MakeItFrom.com », s.d.), ce qui assure de bonnes propriétés mécaniques même à des températures telles que celles observées le jour à la surface de la Lune. Grâce à sa grande stabilité dimensionnelle, le PEI garde aussi ses propriétés mécaniques à de très basses températures, le rendant donc utilisable pendant la nuit lunaire.

Sa densité de $1,27\text{ g/cm}^3$ et son module de Young de 3200 MPa en font un matériau très performant (« PEI (ULTEM 1010) | Filament2Print », s.d.). Le PEI est aussi résistant aux impacts. De plus, il possède une grande résistance au feu et aux solvants chimiques (« Polyetherimides - an overview | ScienceDirect Topics », s.d.). Finalement, après le test E595, les échantillons de PEI perdent entre $0,37\%$ et $0,52\%$ de leur masse, ce qui est moins que le seuil de 1% de perte recommandé pour les applications spatiales (« Outgassing Materials Search Results », s.d.-a).

Les mélanges utilisés dans le cadre de ce mémoire ont été fabriqués avec du PEI Ultem 1010, produit par l'entreprise SABIC.

1.3.1.2 PEEK

Le PEEK a également été choisi par l'équipe CREPEC Vision car il possède les caractéristiques souhaitées pour une utilisation spatiale. C'est un thermoplastique semi-cristallin dont la structure est présentée à la Figure 1.6

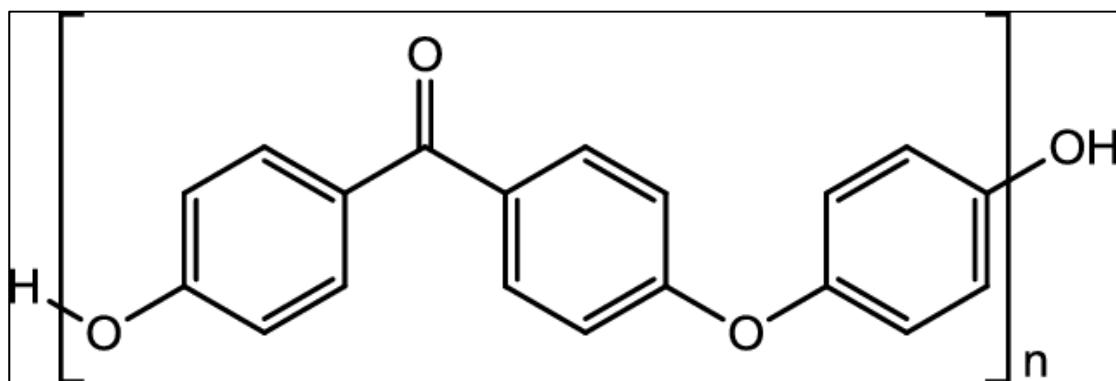


Figure 1.6 Structure du PEEK
Tirée de Yang et al. (2017, p. 118)

Très semblable au PEI, le PEEK est plus résistant aux températures extrêmes et aux impacts. Cependant, ce dernier est plus coûteux (« Polyetherimide - an overview | ScienceDirect Topics », s.d.). Sa température de transition vitreuse est très élevée ($T_g \sim 240^\circ\text{C}$). Le PEEK a une densité de $1,3 \text{ g/cm}^3$ et un module de Young de 4000 MPa (« Unfilled PEEK : MakeItFrom.com », s.d.). Ces valeurs sont légèrement plus grandes que celles du PEI. Tout comme le PEI, le PEEK possède une grande résistance au feu et aux solvants chimiques. Finalement, il répond au standard des tests de résistance au dégazage, car les valeurs de tous les types de PEEK sont sous le seuil de perte de 1% de masse après le test E595 (« Outgassing Materials Search Results », s.d.).

Du PEEK 90G de la compagnie Victrex a été utilisé pour la fabrication des échantillons évalués dans le présent mémoire.

1.3.2 Additifs

Les additifs utilisés sont tous issus du carbone, car ceux-ci s'attachent facilement aux chaînes de polymères qui sont en partie constituées de carbone. De plus, ces additifs offrent une excellente conductivité électrique.

1.3.2.1 Noir de carbone (NDC)

Le NDC possède de nombreuses appellations, telles que noir thermique ou noir de fourneau. C'est une forme amorphe et élémentaire du carbone. Il se trouve sous la forme d'une poudre noire et inodore. Les particules sont de taille nanométrique, mais habituellement, on y trouve des agglomérations de taille micrométrique. Ces dernières ont tendance à se réunir pour composer des granules pouvant atteindre 0,1 à 1 mm. La Figure 1.7 illustre des agrégats de particules de noir de carbone.

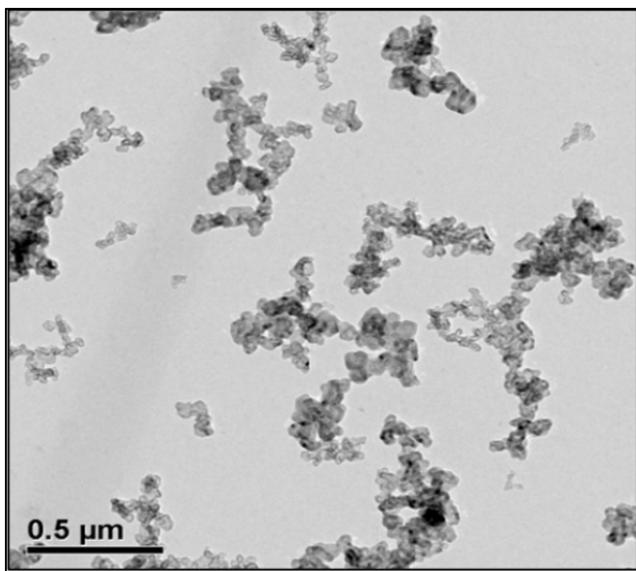


Figure 1.7 Photographie réalisée par microscopie électronique de quelques agglomérats de noir de carbone
Tirée de CARBON (2014)

Le NDC possède de multiples fonctions, la plus importante dans le cas présent est celle d'augmenter la conductivité.

Le noir de carbone est caractérisé par plusieurs propriétés dont deux sont pertinentes dans la présente étude :

- la distribution de la taille des particules,
- la distribution de la taille des agglomérats.

Ces propriétés affectent la conductivité électrique de la matrice obtenue : elles changent la facilité avec laquelle un chemin de NDC peut se former dans le polymère. Différents types de noir de carbone sont disponibles dans le marché industriel. Du Vulcan XC500, de la compagnie Cabot, est utilisé dans le présent contexte. Il reste moins de 10 ppm de cette poudre après le test de mesh 325, ce qui veut dire que presque toutes les agglomérations sont plus petites que 44 µm, car c'est la taille des trous d'un tamis de ce type.

Il est à noter aussi que le NDC augmente la résistance aux rayons UV, ce qui pourrait réduire l'effet du vieillissement du polymère du châssis et, conséquemment, offrir une meilleure protection aux composantes internes (Ghasemi-Kahrizsangi et al., 2015).

1.3.2.2 Graphène (GN)

Le graphène est une forme bidimensionnelle hexagonale cristalline du carbone et constitue l'élément structurel de base d'autres formes allotropiques, comme le graphite, les nanotubes de carbone (cylindriques) et les fullerènes (sphériques). C'est un matériau qui possède une très grande conductivité thermique et électrique (Peres & Ribeiro, 2009). Il est utilisé dans différentes matrices de polymères pour augmenter la protection aux ondes électromagnétiques (Jan et al., 2017). Cependant, cette forme de carbone est plus coûteuse que le NDC.

Dans le cadre des expériences réalisées dans ce projet, du graphène GrapheneBlack 3X de la compagnie Nanoxplore a été utilisé. Les particules de celui-ci sont d'environ 1 à 2 µm et la grandeur médiane des agglomérations est de 38 µm (fiche technique du GrapheneBlack 3X).

1.3.2.3 Fibres de carbone (FC)

Les fibres de carbone sont définies comme ayant au moins 92% de leur masse en carbone. Habituellement, ces fibres sont très minces, soit environ de 5 à 10 µm de diamètre. Elles ont d'excellentes propriétés mécaniques en tension et en compression, ainsi qu'une faible densité. De plus, elles conduisent très bien l'électricité et la chaleur, tout en étant stables chimiquement, sauf à l'oxydation (Huang, 2009). Enrichir un polymère de fibres de carbone est un moyen très répandu pour augmenter les propriétés mécaniques des mélanges. Cette façon de faire pourrait avoir l'avantage d'augmenter à la fois les aspects mécaniques et électriques de la matrice, doublant ainsi l'intérêt de cet additif.

1.4 Polymères existants

Il n'y a malheureusement aucune trace de matrice de PEI-NDC, PEEK-NDC, PEI-GN ou de PEEK-GN dans la littérature. Cependant, il existe quelques études utilisant des additifs carbonés avec une grande variété de polymères. La section suivante présente trois études qui portent sur des mélanges semblables à ceux qui seront testés. Cela permettra une estimation des résultats attendus dans ce mémoire.

1.4.1 Différents polymères avec du graphène ou du NDC

Dans la première étude «Electrical percolation in graphene–polymer composites» (Marsden et al., 2018), un grand nombre de polymères ont été mélangés avec différentes concentrations d'additifs, principalement du graphène, pour déterminer le seuil de percolation de ces mélanges. Malheureusement, aucun de ces mélanges n'a été fait avec du PEI ou du PEEK. Cependant, certains mélanges utilisent du NDC et du graphène, tous deux seront utilisés dans

le cadre de ce mémoire. Les résultats de l'étude jugés pertinents ont été colligés dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Résumé des résultats électriques de l'étude Marsden et al. (2018)

Polymère de la matrice	Additif	Méthode de préparation	Seuil de percolation	Conductivité ultime au courant continu (S/m)
PC	NDC	Mélange en fusion	2,5 % massique	9,1
PP	NDC	Mélange en fusion	7,5 % massique	$3 \cdot 10^{-5}$
PA6	NDC	Mélange en fusion	7,5 % massique	$2,2 \cdot 10^{-8}$
PA11	GNP (nano palette de graphène)	Extrusion de mélange maître	0,25 %vol	$5,2 \cdot 10^{-6}$
PLA	GNP	Mélange de solutions	0,004 %vol	0,1

Le seuil de percolation pour les échantillons contenant du NDC se trouve entre 2,5 % et 7,5 % massique pour les différents polymères, ce qui laisse présager que ce sera le cas pour le PEI et le PEEK. Cependant, il est plus difficile de prévoir la conductivité des matrices, car pour le même additif, celle-ci présente plusieurs ordres de grandeur.

Le seuil de percolation est plus difficile à prévoir pour le GN, car la technique employée pour obtenir la matrice du composite a un grand effet sur le résultat. Il est possible d'atteindre une excellente conduction avec seulement 0,004 % du volume en GN. Cependant, il faut réussir à créer un réseau cristallin plat avec les flocons, ce qu'il n'est pas possible de réaliser en mélangeant à l'aide d'une extrudeuse. Cette technique doit être favorisée dans le cadre du mémoire, car l'objectif est de créer un mélange qui pourra être utilisé comme filament pour

l'impression 3D. Malheureusement, cette méthode mène à des résultats de conductivité nettement inférieurs, car le graphène n'est pas bien orienté dans la matrice. Aucune des études mentionnées dans la revue de Marsden et al. n'utilise cette méthode. Le seuil de percolation obtenu risque d'être nettement plus haut qu'aux concentrations visibles dans le Tableau 1.1. De plus, en pressant les échantillons pour les tester, il est probable que la dispersion du GN ait été affectée et que les résultats obtenus soient différents de ceux qui seraient obtenus pendant la fabrication du rover. Les limites imposées par l'utilisation d'une extrudeuse doivent être prises en compte lors de l'analyse des résultats.

1.4.2 Différents polymères avec du graphène

L'étude «The Role of Selectively Located Commercial Graphene Nanoplatelets in the Electrical Properties, Morphology, and Stability of EVA/LLDPE Blends» (Kurusu, Helal, Moghimian, David, & Demarquette, 2018), a été réalisée sur des échantillons d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) et/ou de polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE) contenant différentes concentrations de graphène. Cette étude est pertinente, car le GN utilisé (Grade heXo-G V20) est très semblable au GrapheneBlack 3X employé dans la présente étude. De plus, les deux produits proviennent de la même entreprise, soit NanoXplore.

De multiples tests ont été réalisés pour caractériser les propriétés mécaniques, rhéologiques et électriques de ces mélanges. Ce qui est particulièrement intéressant dans cette étude, c'est que des échantillons ont été produits avec un mélange des deux polymères immiscibles (EVA/LLDPE). De plus, la méthodologie utilisée pour trouver les caractéristiques électriques est très proche de celle utilisée dans ce mémoire. La Figure 1.8 montre la conductivité des différentes matrices selon la concentration de GN.

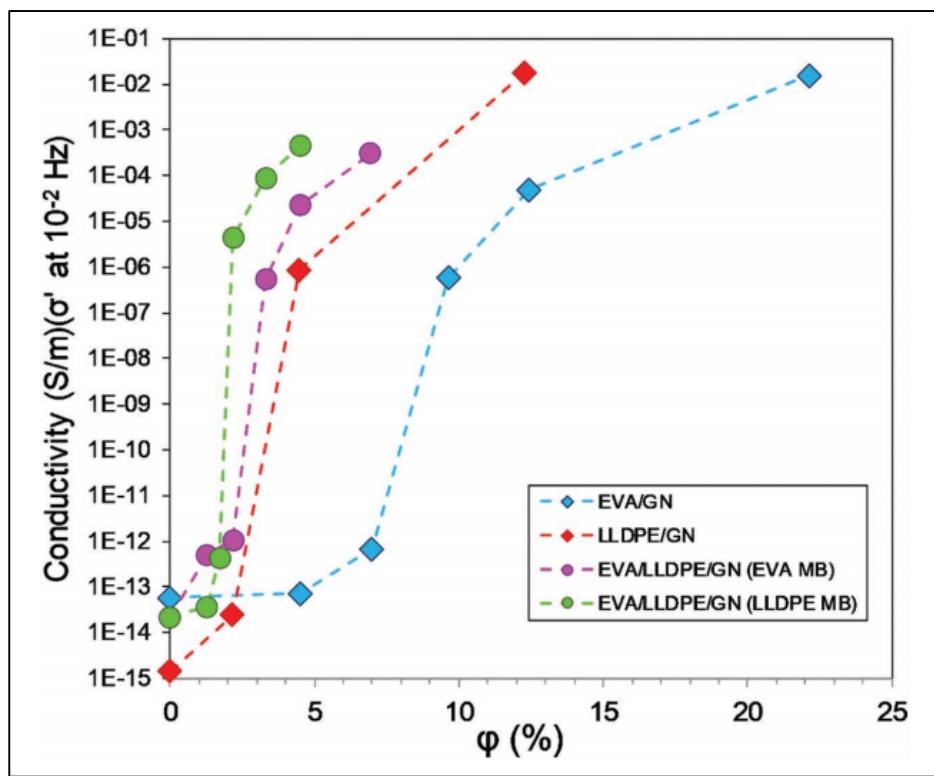


Figure 1.8 Graphique de la conductivité selon la concentration de GN pour différents mélanges de polymères
Tirée de (Kurusu et al., 2018)

Les deux types d'échantillons contenant du EVA et du LLDPE sont composés de masses égales des deux polymères : la différence entre les deux types d'échantillons est le polymère qui a été utilisé en premier pour faire le mélange maître avec le GN. Sur le graphique, il est clair que le seuil de percolation des différents mélanges varie même si ceux-ci contiennent tous le même additif. Les échantillons contenant un mélange des deux polymères arrivent au point de percolation plus rapidement que les échantillons ne contenant qu'un seul polymère. Le point de percolation plus bas des échantillons contenant les deux polymères s'explique par le fait que ces derniers ne se mélangent pas complètement pour former un nouveau polymère. Les additifs ont alors tendance à se placer aux interfaces dans le mélange, ce qui permet de créer un réseau conducteur avec moins d'additifs.

Un autre étudiant dans le groupe CREPEC Vision travaille sur des mélanges de meta-PEI ou para-PEI avec différentes concentrations de PEEK. Les mélanges de meta-PEI et de PEEK sont miscibles. Cependant, les mélanges de para-PEI et de PEEK sont immiscibles (Nemoto, Takagi, & Ohshima, 2010), ce qui permettrait d'obtenir un chemin d'additifs à l'interface des deux polymères ou d'avoir l'additif dans seulement un des deux polymères. Comme le montre cette étude et la précédente, le même additif peut avoir une grande plage de concentrations pour atteindre le seuil de percolation, en fonction, principalement, du polymère dans lequel il est ajouté. Lorsque ces travaux seront plus avancés, il pourrait être intéressant de faire des tests pour voir si l'obtention d'un seuil de percolation plus faible est possible.

1.4.3 Composites de PEI avec des nanofibres de carbone (NFC)

Tel que résumé dans l'article «Study on mechanical, morphological and electrical properties of carbon nanofiber/polyetherimide composites», (Kumar et al., 2007), un composite de PEI avec différentes concentrations de NFC a été testé pour de multiples propriétés. Les membres de cette équipe ont utilisé des NFC désignées comme NFC-100, de la compagnie Carbon Nano-material Technology Co. Ltd. Certaines des NFC ont été traitées dans des bains d'acide carboxylique avant d'être utilisées pour créer l'adhésion de groupes carboxyles à la surface de celles-ci. Le PEI utilisé est de grade Ultem 1010, le même qui sera utilisé dans le cadre de ce mémoire. Les matériaux ont été séchés au moins 12 h avant d'être mélangés pendant 10 minutes dans un mélangeur interne à 320 °C. Les chercheurs ont fabriqué des échantillons allant de 1 à 3 parties de NFC par 100 parties de PEI. Ils ont ensuite réalisé de multiples tests pour mesurer une grande variété de propriétés. Les propriétés électriques sont particulièrement pertinentes pour nous. On peut voir un résumé des valeurs de résistance volumique qu'ils ont obtenues dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Résumé des résultats électriques et thermique de l'étude Kumar et al., 2007

PEI (PCP)	NFC (PCP)	Traitement	Résistivité volumique (Ω cm)	Conductivité thermique W/(m K)
100	-	-	10^{13}	0,3
100	1	Aucun	$3,21 \times 10^{12}$	0,342
100	2	Aucun	$1,98 \times 10^{11}$	0,345
100	3	Aucun	$7,18 \times 10^{10}$	0,351
100	3	Acide	10^9	0,38

La concentration est présentée en partie par centaine de polymères (PCP). On voit que plus la concentration de NFC est grande, plus la résistivité volumique diminue. Toutefois, selon les auteurs de l'étude, les gains restent relativement faibles, ce qui indiquerait que le point de percolation n'a pas été atteint. La conductivité électrique est aussi meilleure avec les NFC qui ont été traitées dans le bain d'acide, probablement parce que les NFC traitées se dispersent mieux dans l'échantillon. Il est aussi possible que les NFC traitées créent de meilleurs liens avec le PEI, facilitant ainsi la transmission des électrons. Il est à noter que la conductivité thermique a aussi augmenté avec la concentration de NFC. Les tests de conductivité thermique ont été réalisés à 50 °C.

L'augmentation de la conductivité électrique est significativement plus rapide que l'augmentation de la conductivité thermique, ce qui est intéressant, puisque l'objectif actuel consiste à augmenter seulement la conductivité électrique. Cela souligne toutefois l'importance de mesurer la conductivité thermique du meilleur mélange trouvé pendant cette étude, car celle-ci sera tout de même affectée par l'ajout d'additifs.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Dans le chapitre 2, nous allons voir la méthode utilisée pour les différentes expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire. Ce chapitre est divisé en sous-sections, ce sont les étapes suivies pour arriver aux résultats (p. 35).

2.1 Séchage du polymère

La première étape consiste à sécher le polymère. Les granules sont chauffés dans un four à vide selon les temps et températures du Tableau 2.1. Ceux-ci sont placés dans un contenant d'aluminium en une mince couche, de façon à n'avoir idéalement qu'une épaisseur de granules, permettant ainsi d'obtenir un assèchement uniforme. Le tableau ci-dessous contient les temps et températures de séchage pour les fragments de PEI et de PEEK.

Tableau 2.1 Paramètres de séchage pour le PEI et le PEEK

Polymère	Temps de séchage (h)	Température (°C)
PEI	4	150
PEEK	3	150

Ce sont les paramètres de séchage conseillés par les fabricants : Sabic pour le PEI et Victrex pour le PEEK. Le temps de séchage est la durée minimale pendant laquelle le polymère est resté dans le four, une fois que la température a été atteinte et qu'un vide presque complet a été obtenu.

2.2 Mélanges avec le noir de carbone

Un premier mélange maître a été réalisé à l'aide d'un mélangeur interne¹ pour chaque polymère. Celui-ci contient 15 %, en fraction massique, de noir de carbone. Le polymère et le NDC sont mélangés pendant 10 minutes à une température de 370 °C. La vitesse de rotation est ajustée tout au long du processus, entre 30 et 50 tours par minute, pour que le moment n'augmente pas à plus de 80 N·cm. Lorsque la période de 10 minutes est écoulée, les vis mélangeuses sont arrêtées, mais la température est maintenue. Le mélangeur est ouvert, puis le maximum de mélange est extrait à l'aide d'une spatule en laiton. Le mélangeur interne ouvert est visible sur la Figure 2.1 ci-dessous.



Figure 2.1 Mélangeur interne utilisé
pour faire les mélanges maîtres

Le mélangeur interne a été nettoyé entre chaque utilisation. La meilleure méthode trouvée consiste à garder les pièces à la température de mélange, pour maintenir le polymère dans un état malléable, et de frotter vigoureusement avec des brosses métalliques qui n'endommagent pas le mélangeur (ex. : laiton). L'utilisation d'un polymère de purge aggrave la situation. Puisqu'aucun matériau ne peut sortir pendant le cycle, ce dernier ne peut être purgé et ne fait

¹ Haake Rheomix OS

que s'agglutiner aux autres polymères à l'intérieur du mélangeur. Il faut donc nettoyer plus de polymère qu'avant son utilisation. Il est particulièrement important d'avoir de l'équipement de protection approprié ainsi qu'une bonne ventilation tout au long de cette étape.

Ce mélange maître a ensuite été déchiqueté pour la prochaine manipulation. Le déchiqueteur est fabriqué par la compagnie *C.W.Brabender Instruments, Inc.* Une photo d'un mélange maître déchiqueté est présentée à la Figure 2.2 ci-dessous.



Figure 2.2 Mélange maître déchiqueté de PEI avec 15 % de NC

Par la suite, de plus petits mélanges ont été réalisés à l'aide d'une micro-extrudeuse². De fait, des mélanges de 0 % à 14 % de masse de NDC, par saut de 2 %, sont réalisés à l'aide de polymère pur séché et de mélange maître déchiqueté (Annexe I, p. 63). Les composants sont pesés à l'aide d'une balance électrique, puis injectés dans la micro-extrudeuse lorsqu'elle est à une température de 370 °C. Celle-ci fonctionne en boucle fermée pendant 10 minutes pour

² Thermo Fisher Scientific Minilab II Haake

mélanger les polymères avec le NDC uniformément. Ensuite, la boucle est ouverte pour sortir le mélange obtenu. La Figure 2.3 montre l'intérieur de la micro-extrudeuse. Une fois que le maximum de mélange est expulsé, le moteur de l'extrudeuse est arrêté. Cette dernière est ouverte pour récupérer autant de matière que possible.

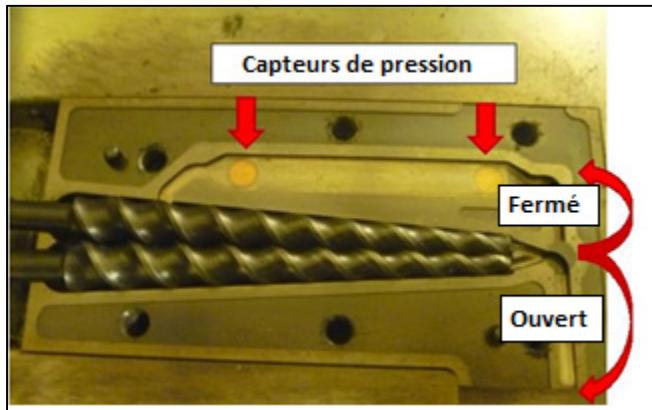


Figure 2.3 Intérieur de la micro-extrudeuse

Pour nettoyer la micro-extrudeuse, tout comme avec le mélangeur interne, il faut garder la température à 370 °C pour frotter l'intérieur à l'aide d'une brosse en laiton et ainsi nettoyer la majeure partie des résidus du composé. Ensuite, il est possible d'utiliser un polymère de purge haute température : du Asaclean PF a été utilisé dans le cours de ce mémoire, en boucle ouverte. Lorsque ce dernier sort de l'extrudeuse sans impureté, c'est signe que les vis sont propres. Il faut ensuite compléter un cycle de 5 minutes en boucle fermée avec le polymère de purge afin de nettoyer le réservoir supérieur. La boucle est ensuite ouverte et le maximum de polymère de purge est expulsé. Finalement, l'intérieur de l'extrudeuse est brossé une dernière fois. L'extrudeuse doit être nettoyée entre chaque mélange.

Les échantillons pèsent environ 5 g parce que ce modèle de micro-extrudeuse a une capacité de 7 cm³. Compte tenu de la densité des polymères utilisés, c'est une quantité qui entre complètement dans l'extrudeuse sans laisser trop d'espace libre, permettant l'obtention d'un mélange homogène.

Finalement, ces micro-mélanges sont déchiquetés avec la déchiqueteuse précédemment mentionnée. Celle-ci doit être nettoyée avec de l'air sous pression afin de déloger tous les granules des anciens mélanges. Cette étape doit être réalisée avant tout nouveau mélange, pour éviter de contaminer les échantillons.

2.3 Mélanges avec le GN

Pour les mélanges avec le GN, les manipulations sont les mêmes qu'avec le NDC. Cependant, par manque de temps, seul le PEEK a été utilisé. De plus, les échantillons de 2 % et 6 % n'ont pas été réalisés, car ceux-ci ont été jugés de moindre importance pour les résultats.

2.4 Traitement pour le PEI avec fibre de carbone

Pour tester l'ajout de fibres de carbone, un filament de PEI contenant déjà une fraction de fibres a été utilisé. Pour avoir des résultats comparables avec les autres additifs, celui-ci a été traité dans la micro-extrudeuse avec les mêmes paramètres que les autres additifs. Cependant, un seul mélange du filament pur a été réalisé.

Le filament «CarbonX™ Carbon Fiber Ultem™ PEI 3D Printing Filament» contient 10,5 % de masse de fibres de carbone selon un calcul d'ingénierie inverse qui est disponible à l'annexe II (p. 65).

2.5 Mise en forme des échantillons

Pour donner la forme aux échantillons, les mélanges sont pressés dans une presse chauffante de la marque Accudyne. Du papier d'aluminium est traité avec des agents antiadhésifs pour s'assurer que le mélange ne colle pas sur les plaques utilisées dans la presse : premièrement, du *Sealer GP* est appliqué sous une hotte sur le papier d'aluminium, puis séché pendant 5 minutes; deuxièmement, une couche de *Loctite Frekote 700-NC* est appliquée; troisièmement, 5 minutes plus tard, le *Sealer GP* est appliqué à nouveau. Il faut réaliser la même séquence jusqu'à obtenir 3 épaisseurs de chaque produit.

Une pile d'environ 5 g de mélange est placée entre deux feuilles d'aluminium traitées. Le tout est ensuite inséré entre deux plaques droites en acier. Puis, l'assemblage est déposé dans la presse qui chauffe jusqu'à 300 °C pour les mélanges de PEI et jusqu'à 335 °C pour les mélanges de PEEK. Une fois la température atteinte, la presse est fermée avec une pression de 3 GPa pour 5 minutes. Lorsque la pression est relâchée, on commence à refroidir l'échantillon et, lorsque la température est assez basse (moins de 150 °C), l'échantillon est démoulé d'entre les plaques d'acier. Il a alors la forme d'un disque d'une épaisseur variant de 0,1 à 0,4 mm. L'épaisseur n'est pas critique, car elle est prise en compte pour trouver la conductivité (section 2.7).

2.6 Plaquage

Avant de réaliser des tests de conductivité, les échantillons sont recouverts d'une mince couche d'or pour assurer un bon contact pendant les tests. Pour ce faire, les échantillons sont placés dans un système de revêtement³ pendant 4 minutes à 30 mA pour recouvrir les échantillons d'une couche d'environ 30 µm d'or. Un échantillon plaqué et découpé est visible à la Figure 2.4.



Figure 2.4 Échantillon de
PEEK-GN 8 % plaqué

³ Quorum Technologies Gold Sputter Coating K550X

2.7 Tests de conductivité à hautes températures

Finalement, des tests de conductivité ont été réalisés par spectroscopie diélectrique à large bande (BDS). Chaque échantillon est placé entre deux disques de cuivre de 40 mm de diamètre et d'une épaisseur d'environ 1 mm. Cet assemblage est placé dans le support visible à la Figure 2.5, qui lui est installé à l'intérieur de la machine.

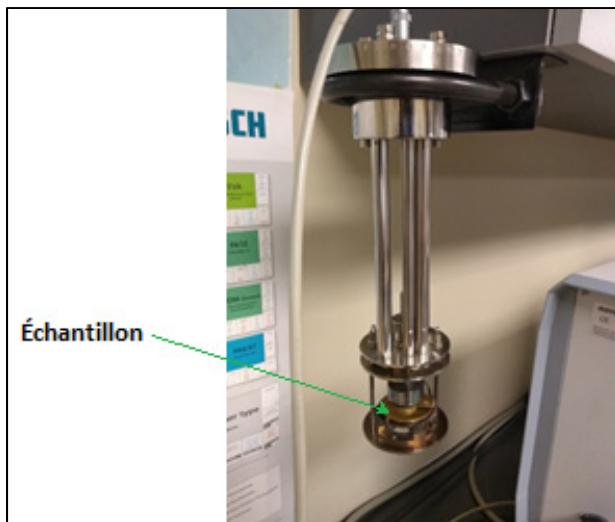


Figure 2.5 Support pour le test de conductivité

Les tests ont été réalisés de 25 °C à 200 °C, par saut de 25 °C. Cette plage de températures a été choisie pour englober les températures qu'on peut trouver à la surface de la Lune, tout en respectant les contraintes de l'équipement de spectroscopie qui ne peut pas réfrigérer les échantillons. Pour ce qui est de la plage de fréquences, des tests ont été réalisés de 0,1 Hz jusqu'à 300 000 Hz, avec un échantillonnage de fréquences suivant une progression géométrique de raison égale à 1,6. Le plateau de la partie réelle de la conductivité complexe se situe à basses fréquences, mais ces dernières sont les plus longues à tester. En réalisant le test à de multiples reprises, il a été constaté que le plateau, lorsque l'échantillon est légèrement conducteur, était visible à 0,1 Hz. La méthode pour trouver la conductivité est pratiquement la même que celle employée dans l'étude de Kurusu et al., 2018, à la différence que la valeur de conductivité réelle n'a pas été mesurée à 0,01 Hz mais à 0,1 Hz. Le calcul pour trouver la

conductivité réelle est expliquée dans la sous-section de la conductivité qui se trouve dans le premier chapitre (p. 11).

2.8 Tests de conductivité à basses températures

Il était prévu de faire des tests de conductivité à basses températures. Cependant, étant donné que l'équipement nécessaire est relativement rare et qu'il se trouve dans des laboratoires non accessibles dans le contexte actuel de pandémie, un seul test a pu être effectué. C'est l'échantillon de PEEK-NDC 8 % qui a été testé à -100 °C à la même plage de fréquences que pour les autres tests, soit de 0,1 Hz jusqu'à 300 000 Hz.

2.9 Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage a été utilisée sur les premiers échantillons pour voir la dispersion du NDC dans le PEI. Les échantillons ont été cassés pour avoir un aperçu transversal de la matière avec du relief. Les morceaux ont été placés à l'intérieur du microscope puis observés sous différentes résolutions. Les images obtenues sont présentées et expliquées au chapitre suivant.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSES

En suivant les méthodes expliquées dans le chapitre précédent, il a été possible d'obtenir les résultats présentés dans ce chapitre. Ils seront aussi analysés tout au long de cette section. Les résultats sont présentés par additifs.

Dans tous les graphiques de la présente section, les axes représentant la conductivité ainsi que ceux représentant la fréquence auront une échelle logarithmique.

3.1 PEI pur

Le PEI est un polymère amorphe ayant de faibles pertes diélectriques lorsqu'il est asséché. La Figure 3.1 ci-dessous illustre les pertes diélectriques du PEI à 25 °C ainsi que la partie réelle de la conductivité complexe à la même température. L'absence de plateau à basse fréquence dans cette dernière courbe montre bien que la conductivité du PEI pur est négligeable.

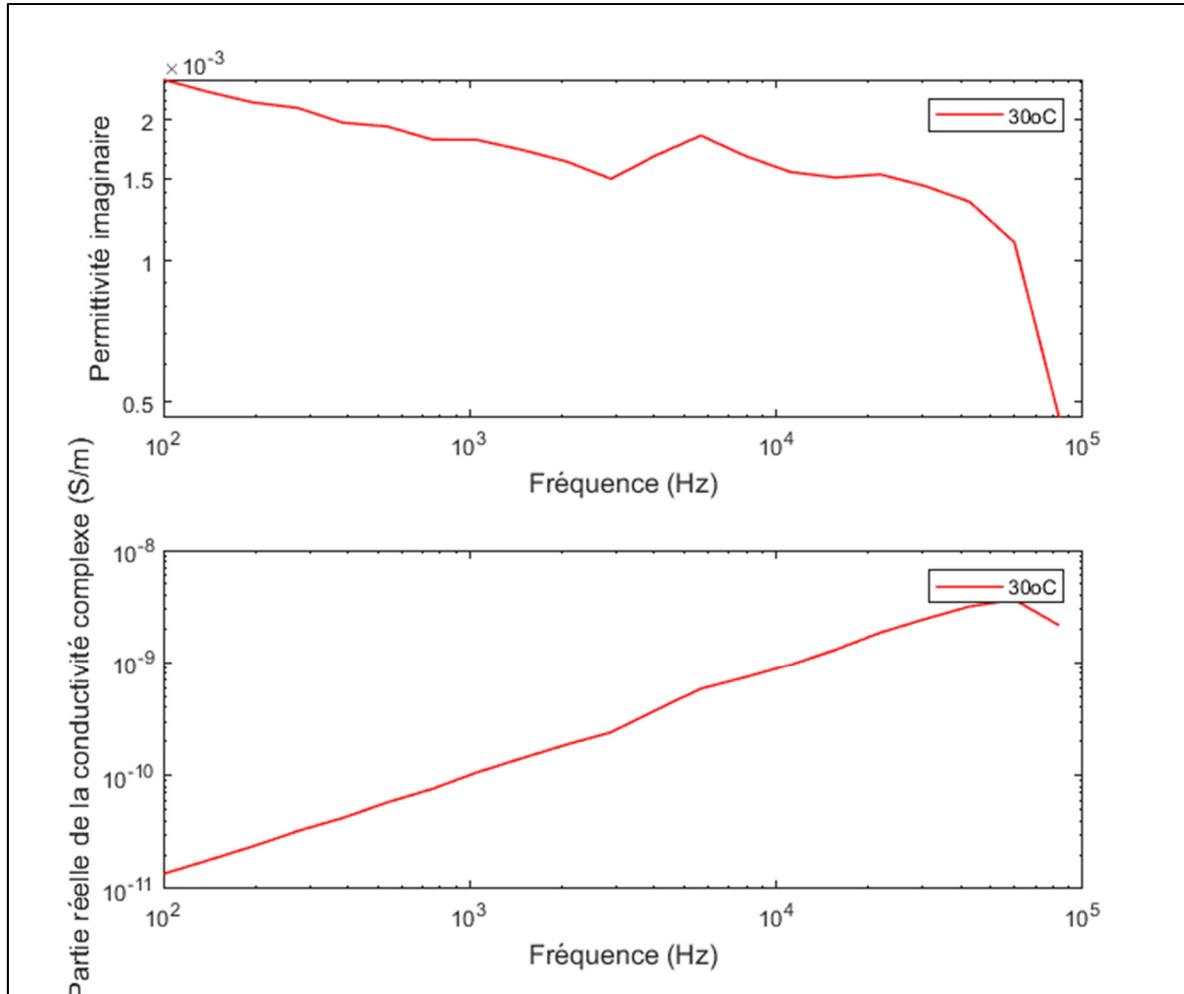


Figure 3.1 Pertes diélectriques (□'') et conductivité complexe (□') du PEI à 25 °C en fonction de la fréquence

Il est possible de voir la conductivité d'un échantillon de PEI pur, qui avait pris légèrement l'humidité pendant son entreposage, avant et après séchage dans un four à vide. Ces valeurs sont présentées à la Figure 3.2 ci-dessous.

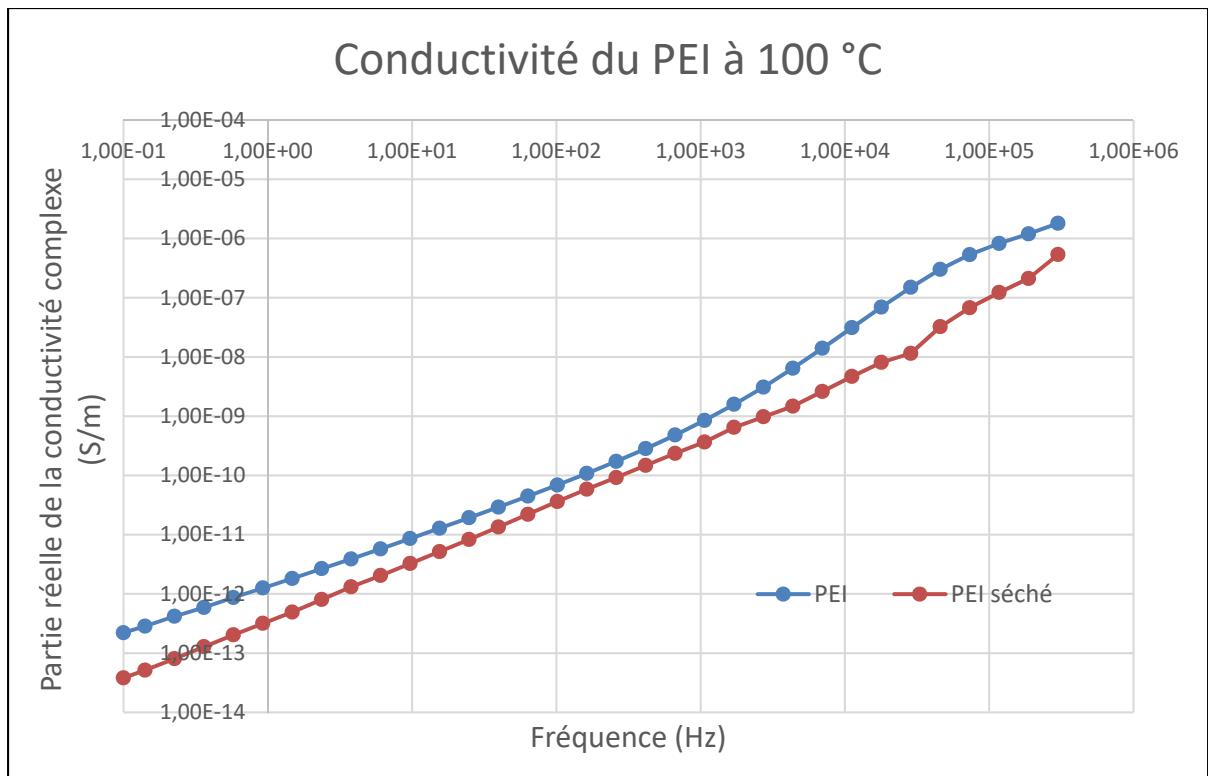


Figure 3.2 Conductivité d'un échantillon de PEI pur selon la fréquence, avant et après séchage

L'échantillon de PEI pur est moins conducteur juste après avoir été séché. Cependant, les deux échantillons ont une conductivité négligeable, illustrée par l'absence d'un plateau à basse fréquence. Dans le contexte lunaire, l'humidité serait expulsée par dégazement, ainsi on peut déduire que le PEI pur du rover aurait une conductivité similaire à l'échantillon séché.

3.2 PEEK pur

Le PEEK est un matériau non-conducteur présentant des pertes diélectriques également faibles à température ambiante. La

Figure 3.3 ci-dessous illustre les pertes diélectriques du PEEK à 25 °C ainsi que la partie réelle de la conductivité complexe à la même température. L'absence de plateau à basse fréquence dans cette dernière courbe montre bien que, tout comme pour le PEI, la conductivité du PEEK pur est négligeable.

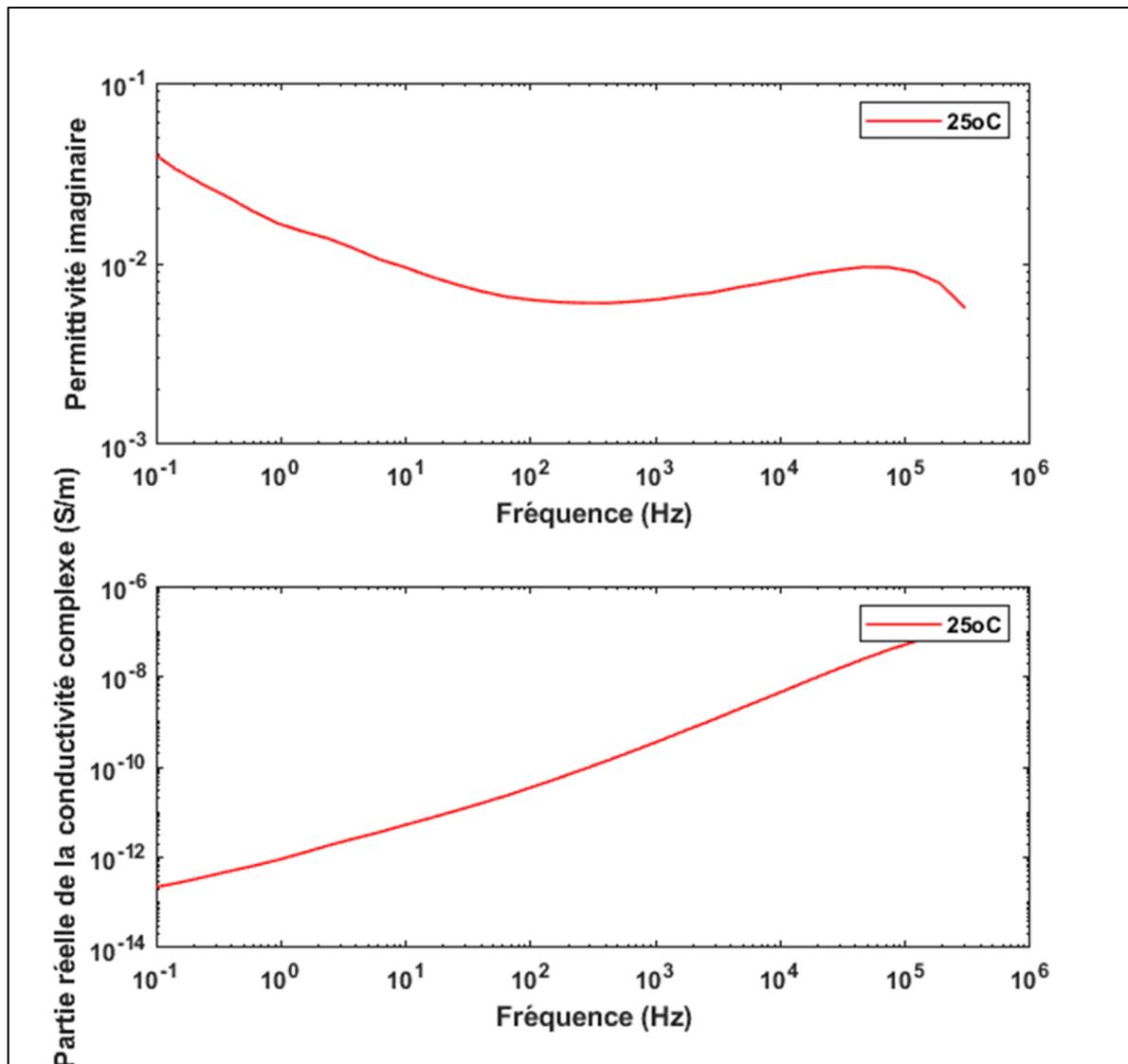


Figure 3.3 Pertes diélectriques (ϵ'') et conductivité complexe (σ') du PEEK à 25 °C en fonction de la fréquence

3.3 PEI-NDC

Dans les prochains graphiques, on peut voir les différentes courbes de la partie réelle de la conductivité complexe des échantillons de PEI-NDC selon la fréquence. La concentration de NDC varie de 0 % à 15 % de la masse, par bond de 2 %. Le graphique de la Figure 3.4 ci-dessous montre ces résultats à une température de 25 °C.

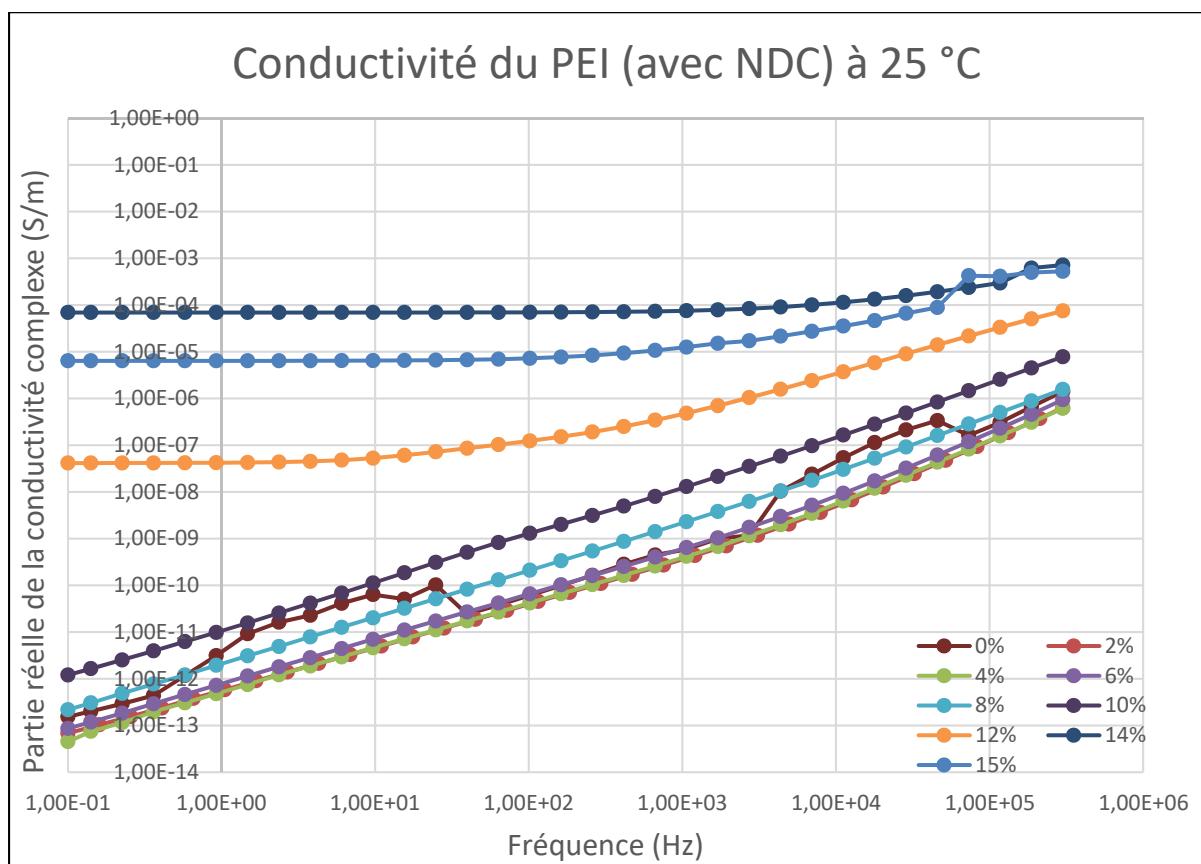


Figure 3.4 Conductivité des échantillons de PEI-NDC selon la fréquence à 25 °C

Dans les échantillons de PEI, l'influence de la concentration de noir de carbone sur la conductivité est bien visible sur le graphique précédent. Cette influence commence à se faire sentir dès 8 %, mais n'a un impact significatif qu'à compter de 12 %. À partir de cette concentration, les courbes possèdent un plateau aux basses fréquences. Cela démontre que la conductivité domine toutes les autres contributions à ces fréquences. En d'autres termes, pour

ces échantillons, la partie réelle de la conductivité complexe n'est pas affectée par la fréquence. Ainsi, la valeur de la partie réelle de la conductivité complexe est équivalente à celle de la conductivité lorsqu'il y a un plateau. Les différentes causes d'erreurs sont expliquées à la section 3.8.

Le graphique de la Figure 3.5 ci-dessous montre ces résultats à une température de 100 °C, ce qui s'approche de la température à laquelle le rover sera soumis pendant le jour lunaire, période de la journée où il sera exposé au vent solaire et aux autres radiations du Soleil. Conséquemment, ces valeurs sont importantes pour le projet.

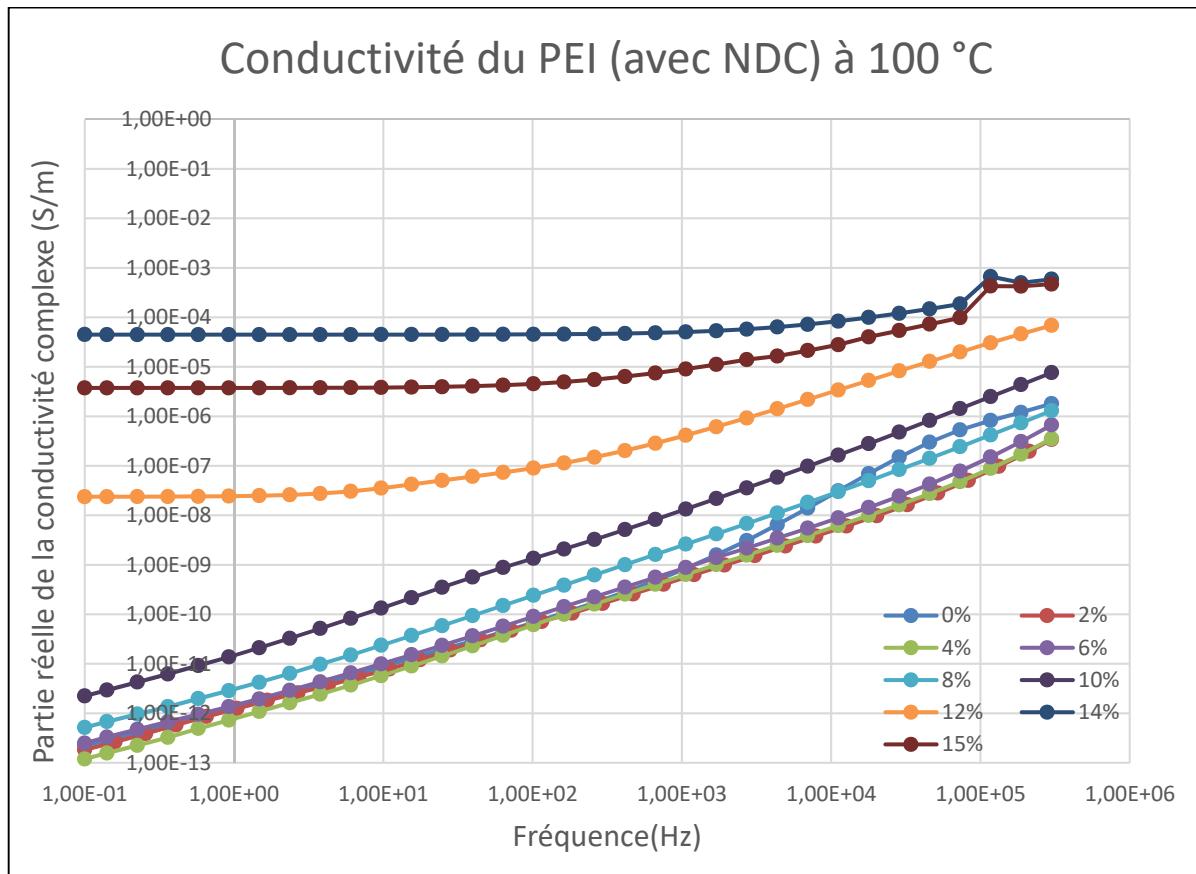


Figure 3.5 Conductivité des échantillons de PEI-NDC selon la fréquence à 100 °C

Un plateau à basse fréquence indique que la conductivité est dominante dans la partie réelle de la conductivité complexe (voir équation (1.2), car la portion de l'équation affectée par la

fréquence n'influence pas la valeur de la partie réelle de la conductivité complexe et est donc négligeable. La partie réelle de la conductivité complexe est alors égale à la conductivité. Les résultats à 100 °C sont pratiquement identiques à ceux obtenus à 25 °C.

Dans le prochain graphique de la Figure 3.6, on peut voir la partie réelle de la conductivité complexe mesurée à 0,1 Hz, en fonction de la concentration de NDC. À partir de 12 %, cette valeur coïncide avec la conductivité. Pour des concentrations inférieures, elle surestime la valeur de la conductivité, car la partie réelle de la conductivité complexe prend en compte l'influence de la permittivité qui est non négligeable. Il y a trois courbes, une à 25 °C, une à 100 °C et une à 200 °C.

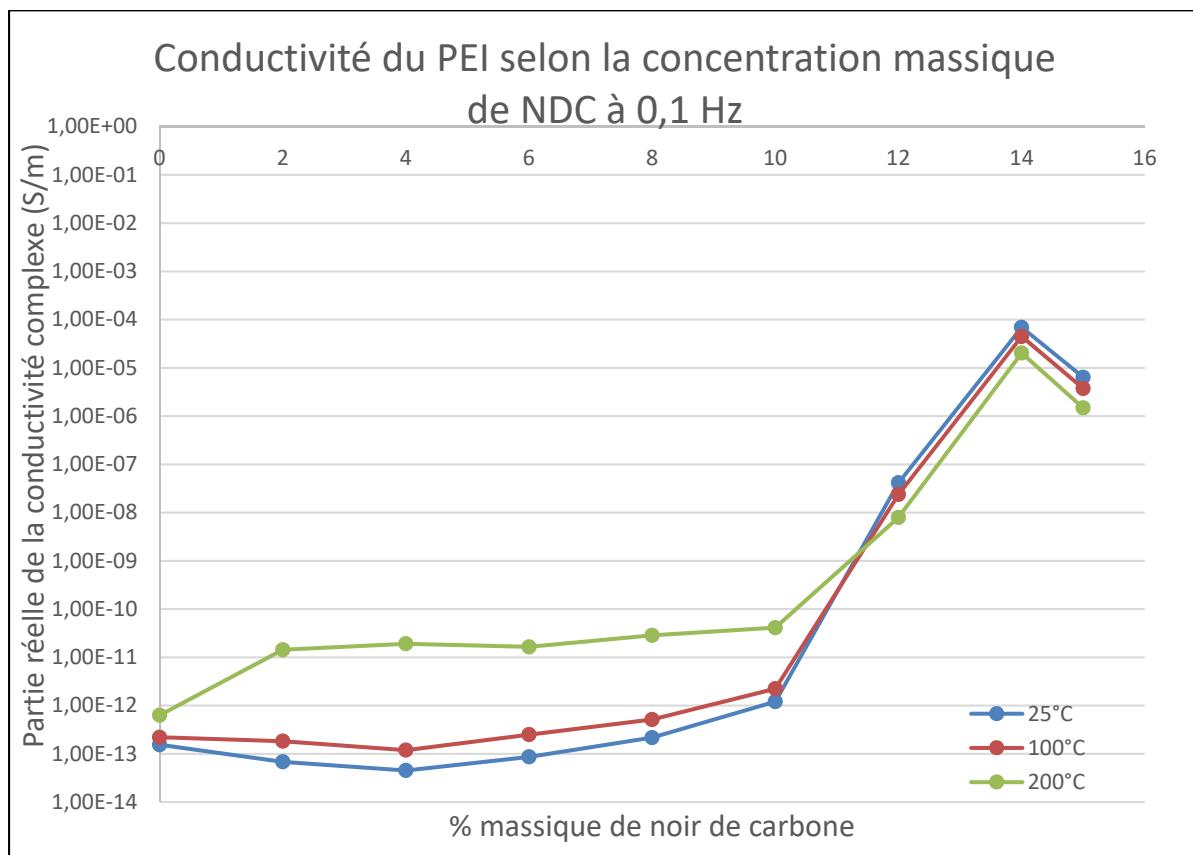


Figure 3.6 Conductivité des échantillons de PEI-NDC selon la concentration de noir de carbone à 3 températures différentes.

Le graphique de la Figure 3.6 contient une grande quantité d'informations importantes.

Premièrement, le seuil de percolation est visible. Pour toutes les températures, la conductivité augmente rapidement autour de 12 % massique de noir de carbone. C'est donc près de cette concentration que le seuil de percolation se situe pour le mélange PEI-NDC en utilisant la méthode expliquée au chapitre 2 (p. 27) pour la fabrication des matrices.

Deuxièmement, la température affecte peu la conductivité. À des concentrations inférieures au seuil de percolation, l'augmentation de la température entraîne une augmentation importante du terme des pertes diélectriques ($\omega\epsilon_0\epsilon''(\omega)$) de l'équation (1.2), de telle sorte que les valeurs de la partie imaginaire de la conductivité complexe sont plus élevées. À partir du seuil de percolation, les écarts entre les différentes températures sont moins marqués puisque c'est la conductivité qui domine cette valeur.

Troisièmement, on peut facilement observer à quelles concentrations et températures la conductivité dépasse le seuil recherché de $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ (p. 11). Pour toutes les températures, cette valeur est dépassée dès que la concentration de noir de carbone excède 10 % massique.

Après les premiers tests réalisés avec les échantillons de PEI-NDC, quelques échantillons ont été observés grâce à la MEB, principalement pour analyser la répartition du NDC et ainsi comprendre pourquoi la concentration massique permettant d'obtenir le seuil de percolation des échantillons était plus élevée que celles des études mentionnées à la section 1.4. Les différents mélanges avec du NDC, utilisant une technique de mélange semblable à celle utilisé dans ce mémoire, possédaient un seuil de percolation à 7,5 % massique, ce qui est notablement moins que les résultats de 10 % ou 12 % observés dans le cas présent. Des images prises des échantillons de PEI-NDC de 6 % et 10 % sont visibles aux Figure 3.17 et Figure 3.18 ci-dessous.

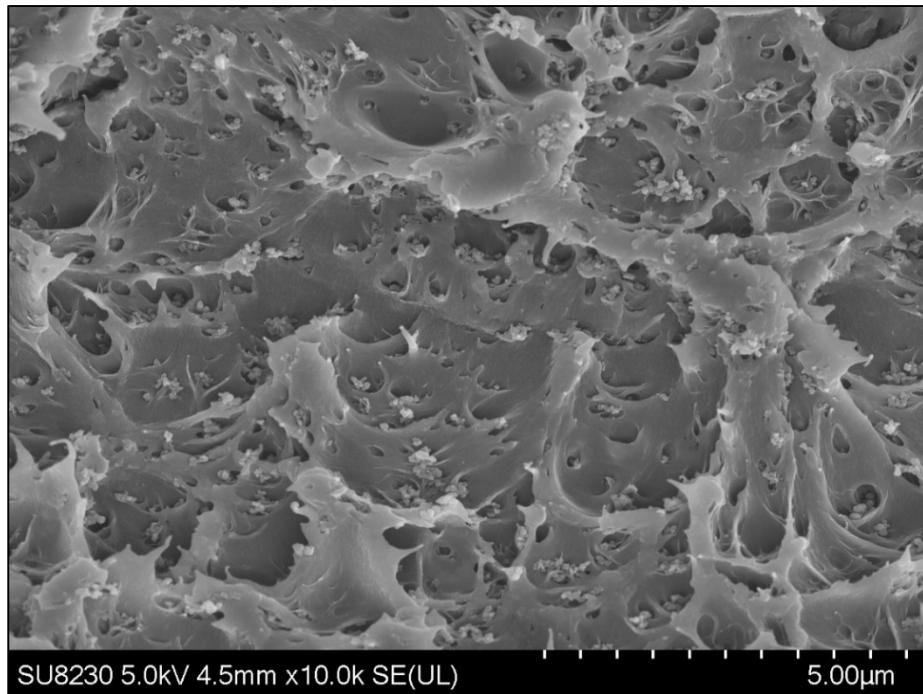


Figure 3.7 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC à 6 % massique

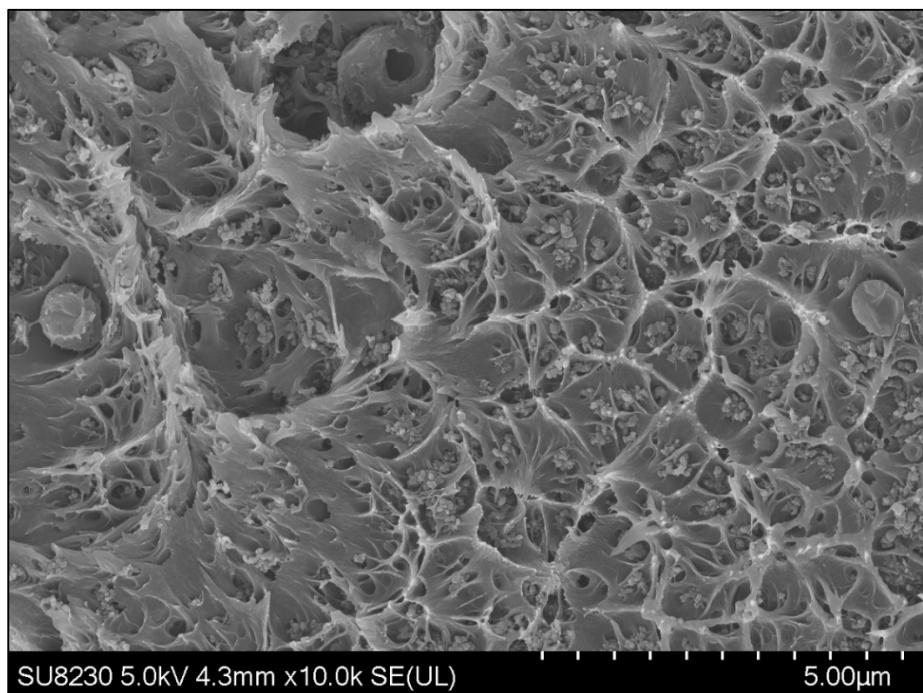


Figure 3.8 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC à 10 % massique

Dans ces images et dans toutes les autres prises des différents échantillons, disponibles à l'annexe III (p. 67), le NDC (les petites boules) semble très bien dispersé dans le polymère, ce qui indique que le mélange est homogène. Toutefois, cela limite les chances d'avoir un chemin conducteur. Si l'additif conducteur est placé de façon stratégique, comme dans les études présentées à la section 1.4, le seuil de percolation sera plus bas. Avec une excellente dispersion comme celle observée dans les échantillons, il faut nécessairement plus d'additifs pour créer un réseau pouvant conduire les charges. L'avantage d'une bonne dispersion est que, peu importe la forme donnée ou les manipulations faites au polymère (exemple : impression 3D), la conductivité sera la même.

3.4 PEEK-NDC

Les mêmes tests ont été effectués sur les échantillons de PEEK-NDC et sur ceux de PEI-NDC. C'est pour cette raison que la présente section est structurée de la même manière que la précédente. Les prochains graphiques montrent les différentes courbes de la conductivité des échantillons de PEEK-NDC selon la fréquence. La concentration de NDC varie de 0 % à 15 % par bond de 2 %. Le graphique de la Figure 3.9 ci-dessous montre ces résultats à une température de 25 °C.

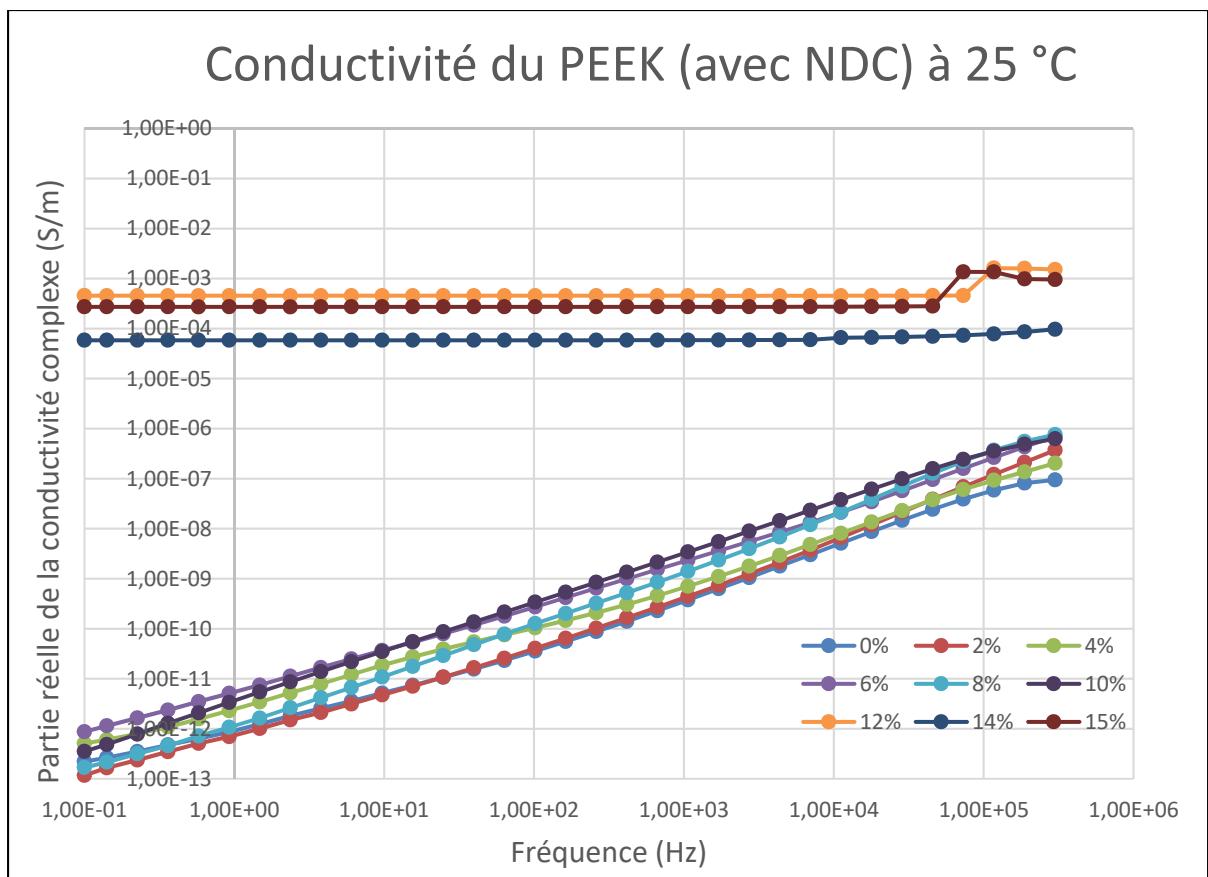


Figure 3.9 Conductivité des échantillons de PEEK-NDC selon la fréquence à 25 °C

Les résultats obtenus avec le PEEK-NDC sont très semblables à ceux obtenus avec le PEI-NDC, à l'exception que la différence entre 10 % et 12 % massique de NDC est encore plus marquée. Les échantillons avec 12 % et plus possèdent un plateau plus grand que les échantillons de PEI avec les mêmes concentrations de NDC.

La Figure 3.10 ci-dessous montre ces résultats à une température de 100 °C.

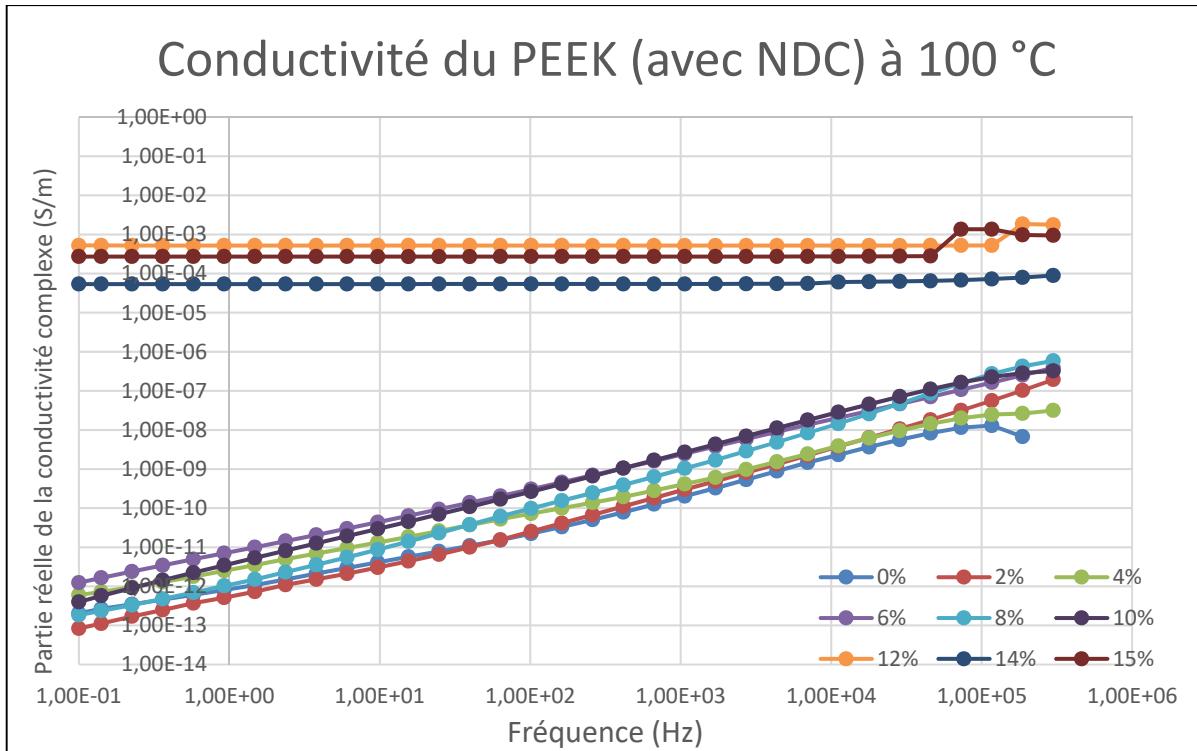


Figure 3.10 Conductivité des échantillons de PEEK-NDC selon la fréquence à 100 °C

La partie réelle de la conductivité complexe des différents échantillons de PEEK-NDC est presque la même selon la fréquence à 100 °C qu'à 25 °C. L'échantillon de 12 % est le plus conducteur, mais cela est probablement dû à quelques erreurs lors de la fabrication des échantillons et de la prise de mesure de la conductivité de ces derniers. Toutes les causes d'erreur sont abordées à la fin du chapitre.

Dans la Figure 3.11 ci-dessous, la relation entre la partie réelle de la conductivité complexe mesurée à 0,1 Hz et la concentration massique de NDC est illustrée. À partir de 12 %, la partie réelle de la conductivité complexe coïncide avec la conductivité. Pour des concentrations inférieures, les courbes surestiment la valeur de la conductivité car la deuxième portion de l'équation (1.2) n'est pas négligeable pour ces échantillons. Il y a trois courbes, une à 25 °C, une à 100 °C et une à 200 °C.

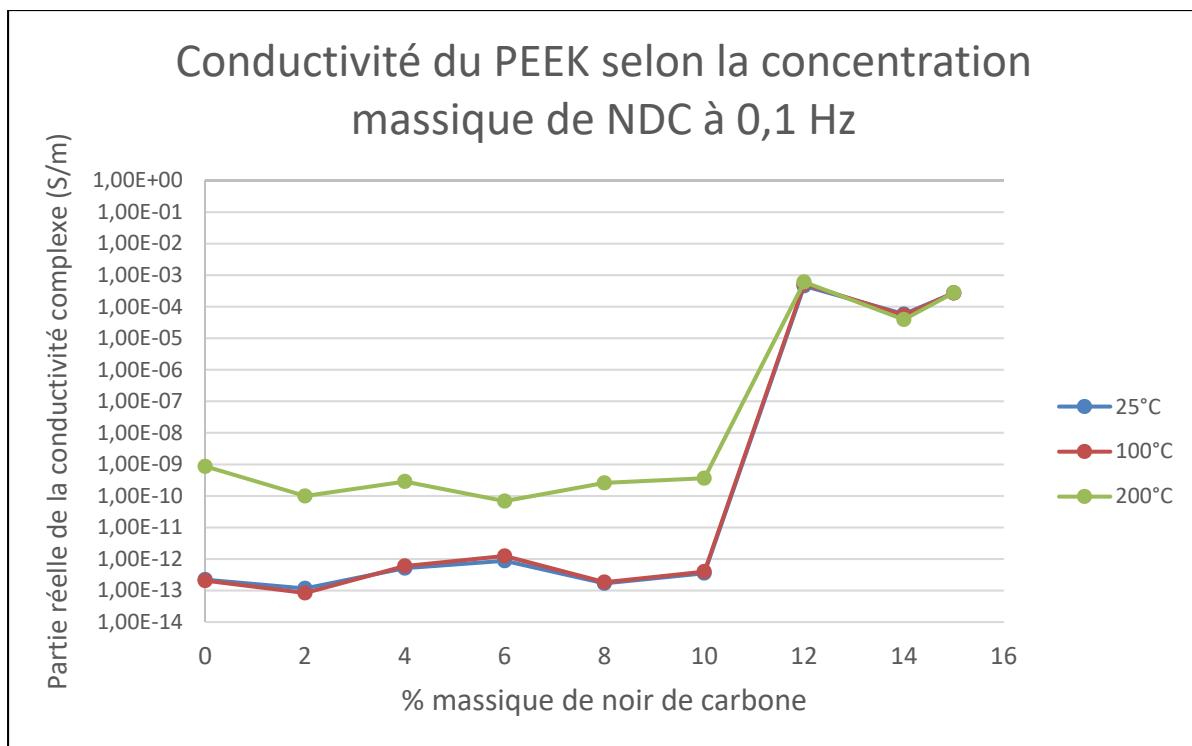


Figure 3.11 Conductivité des échantillons de PEEK-NDC selon la concentration de noir de carbone à 3 températures différentes

Les graphiques indiquant le seuil de percolation sont les plus importants pour le présent mémoire. Celui pour les matrices de PEEK-NDC ci-dessus ne fait pas exception.

Tout comme pour le PEI-NDC, le seuil de percolation est visible. Pour toutes les températures, la conductivité augmente drastiquement autour de 12 % massique de noir de carbone. Ce gain est encore plus marqué avec le PEEK qu'avec le PEI. Le seuil de percolation se situe assurément proche de 12 % pour le mélange PEEK-NDC si la méthode, expliquée au chapitre 2 (p. 27) pour la fabrication, des matrices est employée.

La température affecte peu la conductivité. Elle augmente de façon importante le terme des pertes diélectriques ($\omega\epsilon_0\epsilon''(\omega)$) de l'équation (1.2), de telle sorte que les valeurs de la partie imaginaire de la conductivité complexe sont plus élevées. Cette influence est particulièrement importante pour les tests à 200 °C. Ce phénomène est bien visible sur le prochain graphique.

À partir du seuil de percolation, les écarts entre les différentes températures sont moins marqués, puisque c'est la conductivité qui domine cette valeur.

On peut facilement observer à quelles concentrations et températures la conductivité dépasse le seuil recherché de $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ (p. 11). Pour toutes les températures, cette valeur est dépassée dès que la concentration de noir de carbone atteint 12 %, ce qui est comparable aux résultats obtenus avec le PEI-NDC.

Tel que mentionné dans la méthodologie, un seul échantillon a pu être testé à basse température. C'est le PEEK-NDC 8 %. Celui-ci a été testé à -100 °C, en plus d'être testé à toutes les autres températures allant de 25 °C à 200 °C. Le graphique comparant la permittivité imaginaire à toutes les températures pour cet échantillon est visible à la Figure 3.12 ci-dessous.

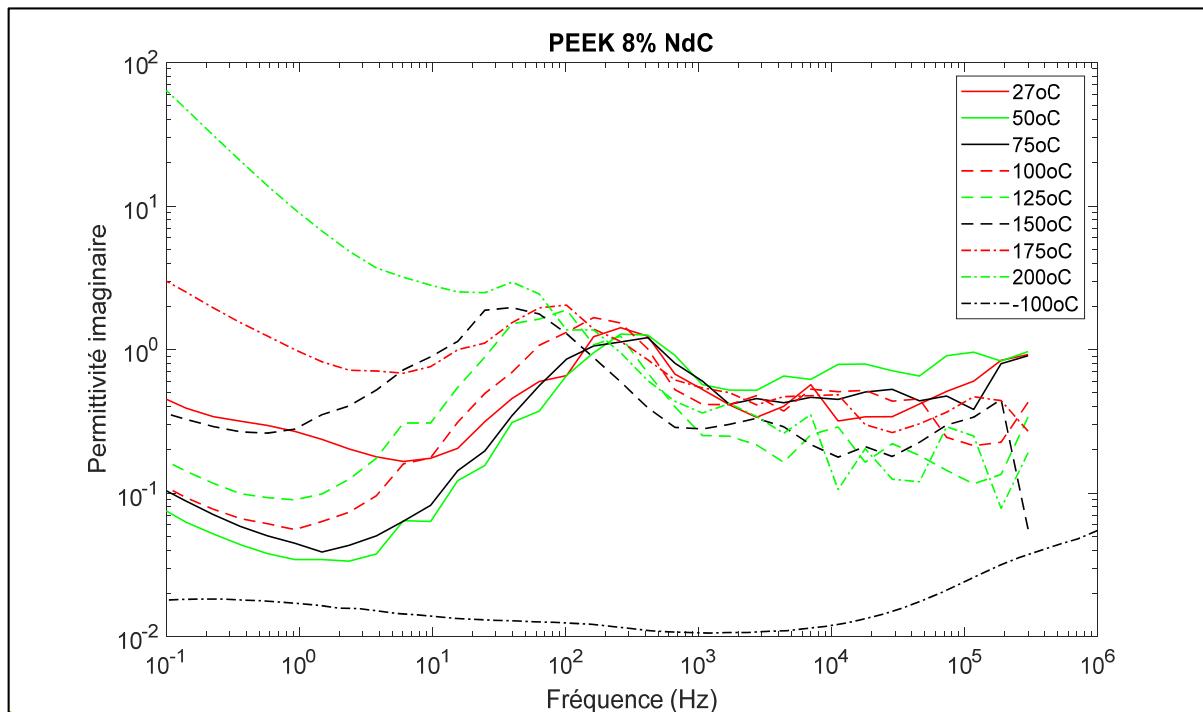


Figure 3.12 Permittivité imaginaire d'un échantillon de PEEK-NDC 8 % de -100 °C à 200 °C

L'effet de la température sur la permittivité imaginaire a déjà été observé grâce à d'autres graphiques. Cependant, celui de la Figure 3.12 permet de mieux comprendre cet effet. La

permittivité imaginaire de l'échantillon est particulièrement faible à -100 °C. Cela affecte la partie réelle de la conductivité complexe par la deuxième portion de l'équation (1.2).

Le graphique comparant la partie réelle de la conductivité complexe à toutes les températures de cet échantillon se trouve à la Figure 3.13 ci-dessous.

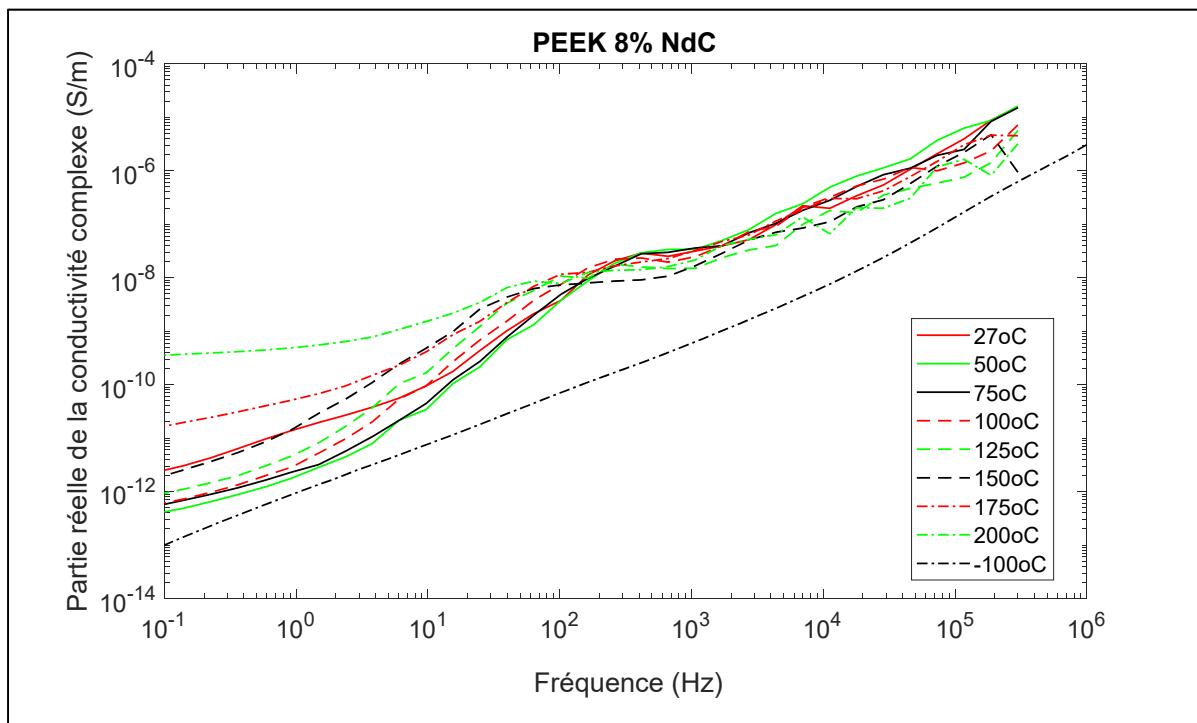


Figure 3.13 Conductivité d'un échantillon de PEEK-NDC 8 % de -100 °C à 200 °C

La partie réelle de la conductivité complexe de l'échantillon de PEEK-NDC 8 % est extrêmement faible, particulièrement à -100 °C. Cela est en partie attribuable à la faible permittivité imaginaire à cette température. Il aurait été intéressant de tester un échantillon réellement conducteur, ayant une concentration de NDC supérieure au seuil de percolation. La température ne semble pas affecter la conductivité de 25 °C à 200 °C. Cependant, il y aurait lieu de faire plus de tests à basse température pour s'assurer d'une bonne protection nocturne face aux radiations.

3.5 PEI-FC

Un seul échantillon de PEI contenant des fibres de carbone a été testé. Les résultats obtenus à 100 °C sont visibles à la Figure 3.14 ci-dessous.

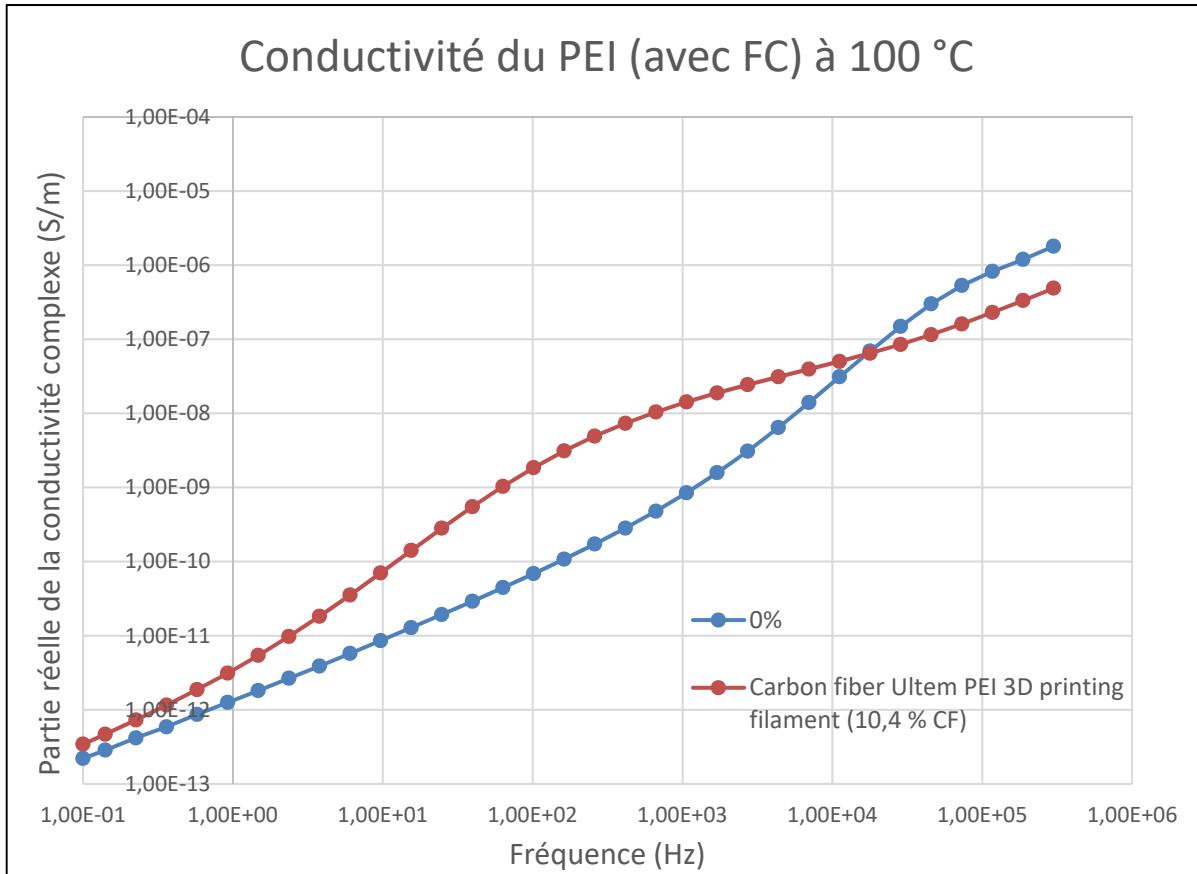


Figure 3.14 Conductivité des échantillons de PEI-FC selon la fréquence à 100 °C

On peut voir à la Figure 3.14 que la différence de conductivité entre le PEI pur et le filament de PEI contenant 10,4 % de sa masse en fibres de carbone est presque négligeable à 100 °C. Cela est également le cas pour les autres températures testées. Cette faible différence indique que le point de percolation n'a pas été atteint, ce qui est peu étonnant étant donné que les autres additifs atteignent leur point de percolation à des concentrations plus élevées. C'est aussi pour cette raison qu'un seul échantillon a été testé, parce qu'il était impossible de fabriquer des

échantillons à plus grandes concentrations, car seul du filament à 10,4 % massique de FC était disponible.

3.6 PEEK-GN

Les mêmes tests de conductivité ont été complétés avec les échantillons de PEEK-GN qu'avec tous les autres échantillons. Les prochains graphiques montrent les différentes courbes de la partie réelle de la conductivité complexe des échantillons de PEEK-GN selon la fréquence. La concentration de GN des échantillons varie de 0 % à 15 %. Le graphique de la Figure 3.15 ci-dessous montre ces résultats à une température de 25 °C.

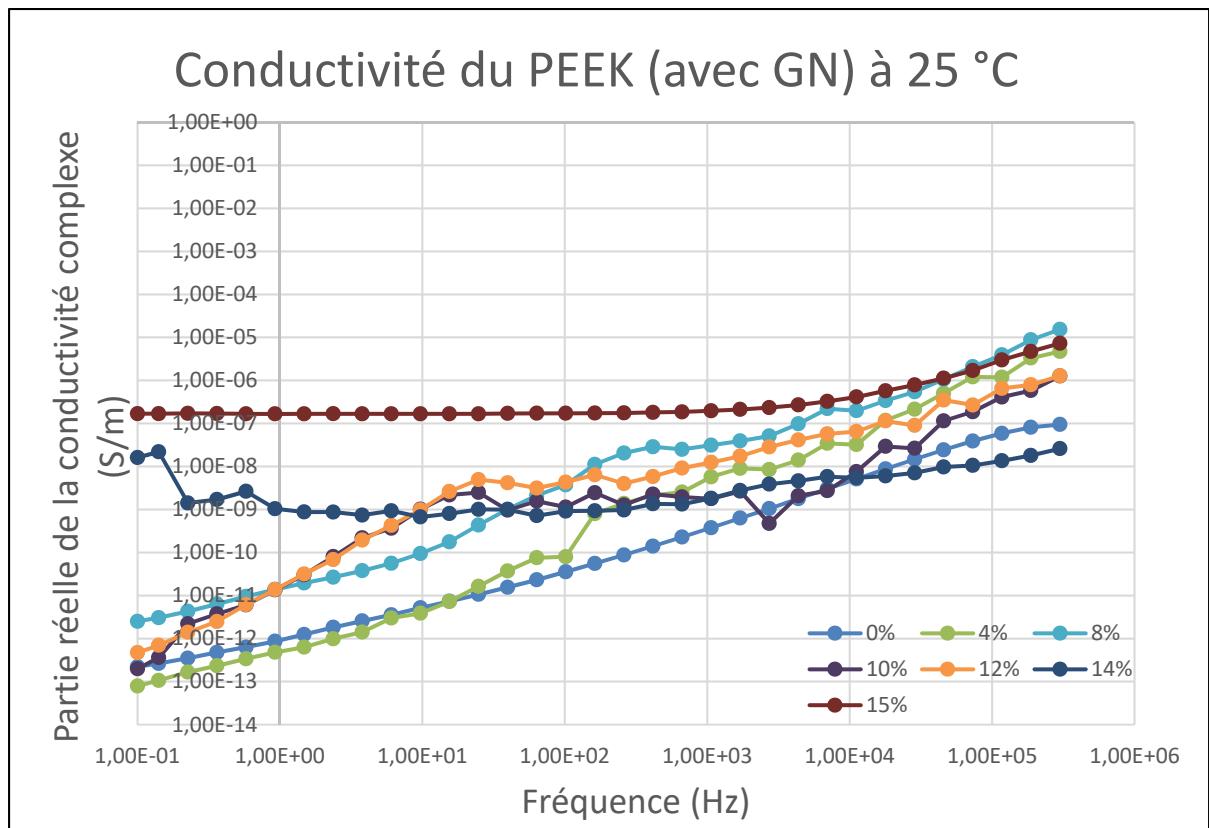


Figure 3.15 Conductivité des échantillons de PEEK-GN selon la fréquence à 25 °C

Les échantillons de 2 % et de 6 % massiques de GN n'ont pas été fabriqués parce qu'avec les résultats obtenus pour le NDC, tout laissait croire qu'ils n'auraient que peu d'intérêt.

Comparativement aux tests avec le NDC, la progression de la partie réelle de la conductivité est plus graduelle. La conductivité ne semble dominer que pour les échantillons de 14 % et de 15 % comme le montre le plateau de ces deux échantillons. Cela laisse présager que les résultats du graphène seront moins bons que ceux avec le NDC et nettement moins bons que ceux des études comparatives de la section 1.4.

Le graphique de la Figure 3.16 montre les mêmes tests réalisés à 100 °C sur les matrices de PEEK-GN.

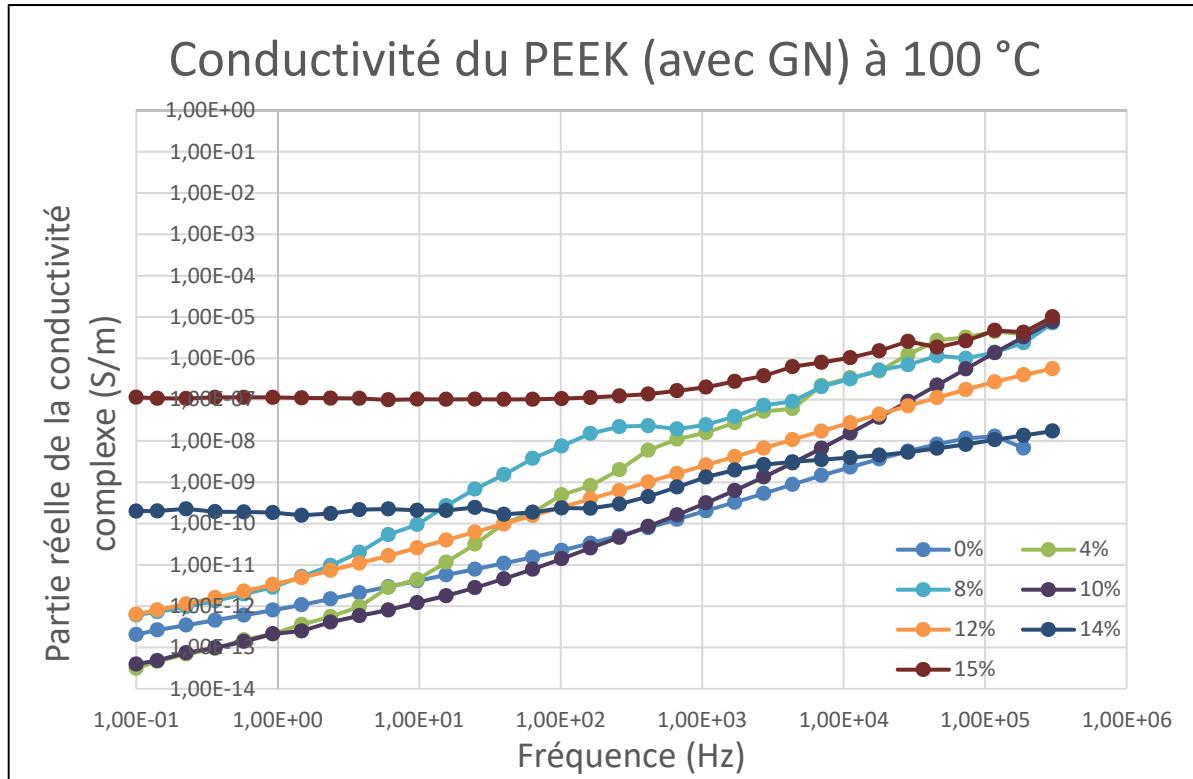


Figure 3.16 Conductivité des échantillons de PEEK-GN selon la fréquence à 100 °C

La lecture des résultats est plus claire à 100 °C qu'à 25 °C. Les courbes sont moins sinueuses, particulièrement celle de l'échantillon à 14 % massique de GN, pour lequel le plateau est plus stable. Toutefois, les échantillons conducteurs sont les mêmes : 14 % et 15 %. Ce sont les seuls échantillons qui dépassent le seuil recherché de $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ (p. 11) pour toutes les températures testées (25 °C à 200 °C).

Dans la Figure 3.17 ci-dessous, la relation entre la partie réelle de la conductivité complexe mesurée à 0,1 Hz et la concentration massique de GN dans le PEEK est illustrée. À partir de 14 %, la partie réelle de la conductivité complexe coïncide avec la conductivité. Pour des concentrations inférieures, elle surestime la valeur de la conductivité. Il y a trois courbes, une à 25 °C, une à 100 °C et une à 200 °C.

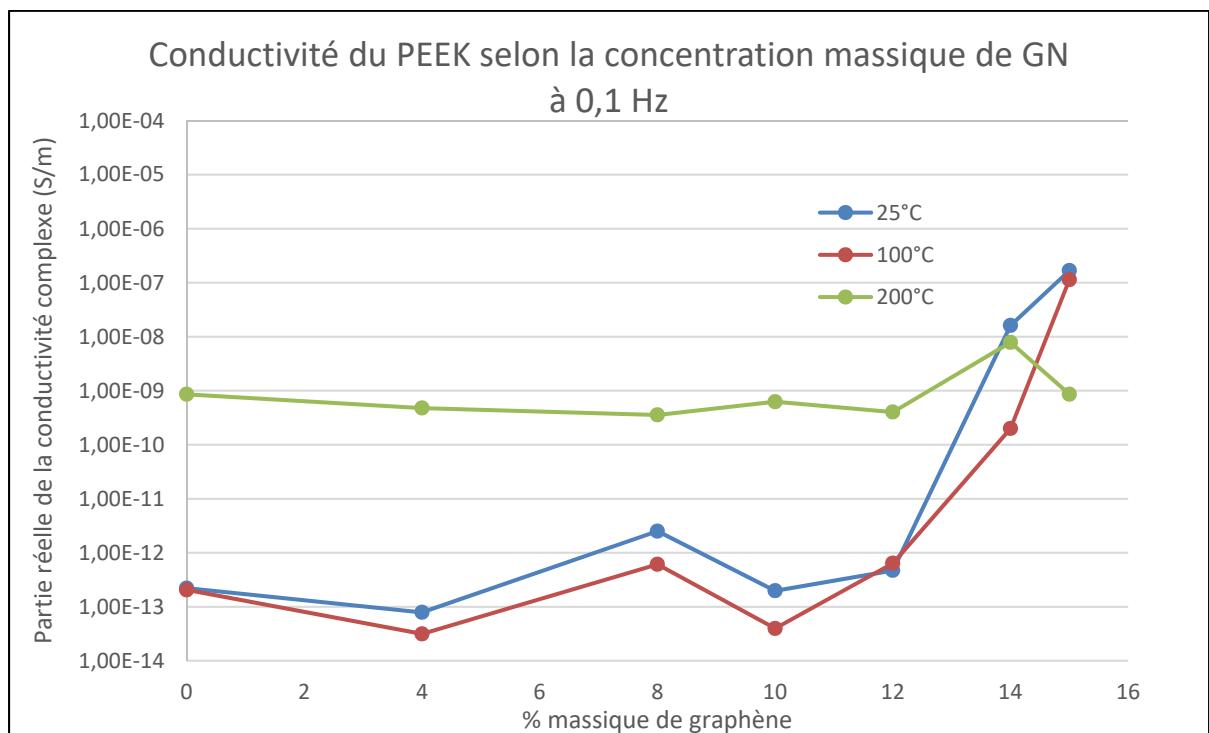


Figure 3.17 Conductivité des échantillons de PEEK-GN selon la concentration de graphène à 3 températures différentes

Ce graphique contient l'information essentielle des tests réalisés avec les matrices de PEEK-GN.

Tout comme pour les mélanges utilisant du NDC, le seuil de percolation est visible. Pour les courbes de 25 °C et de 100 °C, la conductivité augmente rapidement autour de 14 % massique de graphène. Ce seuil de percolation est nettement plus élevé que ceux colligé dans la section 1.4 pour les études utilisant du GN. La méthode de mélange et la mise en forme des échantillons

en sont probablement la cause. Lors du mixage dans la micro-extrudeuse, les flocons de graphène peuvent être pliés, cassés ou simplement moins bien placés que dans les études comparatives utilisant des méthodes avec beaucoup moins de cisaillement.

La température augmente de façon importante le terme des pertes diélectriques ($\omega\epsilon_0\epsilon''(\omega)$) de l'équation (1.2). Cette influence est particulièrement importante pour les tests réalisés à 200 °C, Figure 3.17.

La conductivité dépasse le seuil recherché de $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ (p. 11) pour les échantillons de 14 % et de 15 % à toutes les températures. Ce serait donc à ces concentrations qu'il faudrait employer un mélange de PEEK-GN si l'on veut utiliser ce mélange pour dissiper les charges dans le rover lunaire. Cependant, ces résultats ont été obtenus avec du graphène non aligné dans les échantillons. Il est certain que le seuil de percolation serait plus faible avec du graphène aligné.

3.7 Comparaison entre les différents mélanges

Dans la Figure 3.18 ci-dessous, la relation entre la partie réelle de la conductivité complexe, mesurée à 0,1 Hz et à 100 °C, et la concentration massique des différents additifs est illustrée. À partir de 12 %, la partie réelle de la conductivité complexe coïncide avec la conductivité pour les échantillons contenant du NDC. Pour ceux avec le GN, c'est à partir de 14 % massique que la partie imaginaire de la permittivité devient négligeable.

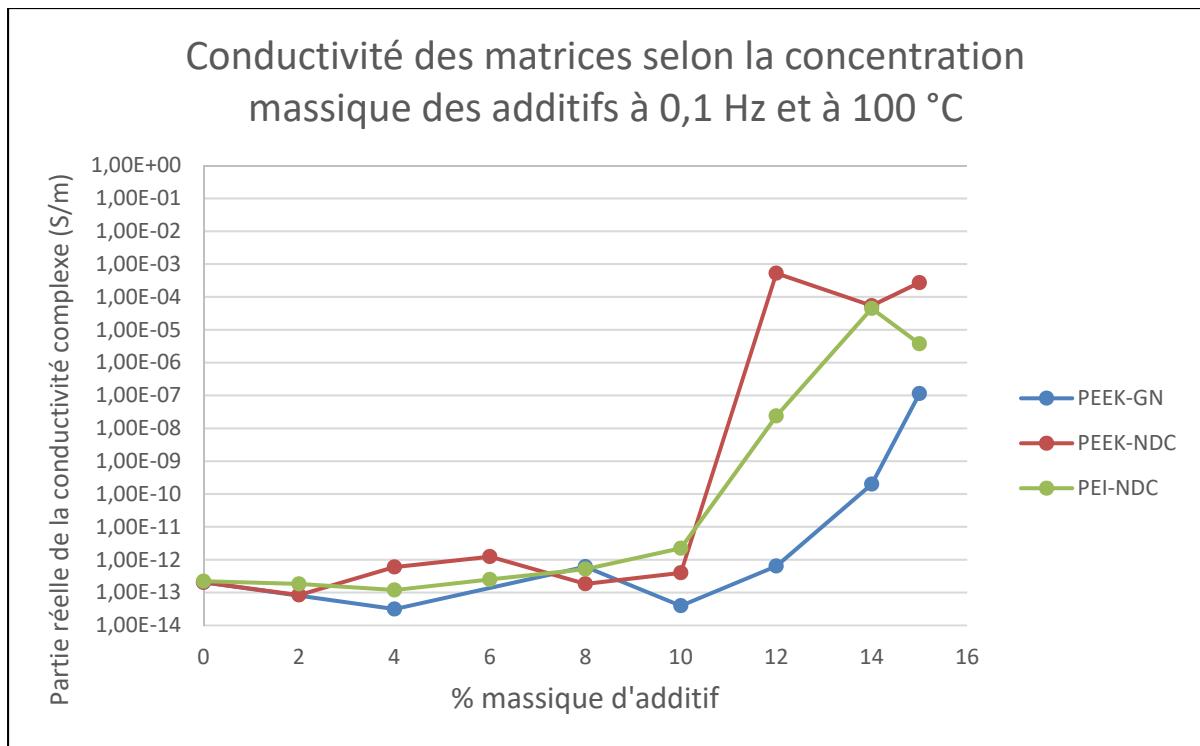


Figure 3.18 Conductivité des différents types d'échantillons selon la concentration massique d'additif à une fréquence de 0,1 Hz et à 100 °C

Dans le graphique comparatif, il est possible de voir les points de percolation des différents mélanges. Les deux mélanges qui contiennent du NDC comme additif ont des courbes très similaires. Ces mélanges semblent plus conducteurs que les matrices utilisant du graphène à des concentrations plus grandes que 10 % de la masse, la concentration où l'additif conducteur commence à jouer son rôle.

Le point de percolation est aussi plus bas pour le NDC. Avec la méthode de mélange employée, le noir de carbone est un meilleur additif pour augmenter la conductivité électrique. Il faut moins de NDC que de GN pour atteindre le point de percolation dans le même polymère (PEEK). De plus, la conductivité est plusieurs dizaines de fois supérieure. Une matrice avec du NDC va mieux dissiper les charges induites par les radiations grâce à cela.

Aussi, en ayant besoin de moins d'additifs conducteurs, ses autres propriétés, mécaniques par exemple, risquent d'être moins affectées.

C'est pour toutes ces raisons que le NDC est le meilleur additif testé pour créer un mélange, avec le PEI ou le PEEK, qui pourrait protéger des radiations sur la Lune pendant le jour. Malheureusement, en raison du manque de données à basse température, il est impossible de prévoir la conduction de tels mélanges lors de la nuit lunaire.

3.8 Causes d'erreur

Il y a plusieurs causes d'erreur qui peuvent affecter les résultats. Les plus importantes seront nommées dans la présente section.

Pour la fabrication des mélanges, les balances employées sont très précises. Cependant, les polymères employés se présentent sous la forme de granules, il est donc parfois impossible d'obtenir la masse voulue au centième de gramme près, car ceux-ci en pèsent quelques centigrammes. Pour les additifs, le problème est tout autre, puisqu'une partie de la poudre colle aux parois des bêchers, la quantité pesée ne se retrouve pas complètement dans le mélange, ce qui affecte l'exactitude de la concentration des additifs dans les matrices.

Le temps de mélange des polymères est toujours le même, cependant la portion extraite manuellement des machines reste plus longtemps au chaud que la partie extrudée. Les températures choisies pour les appareils sont inférieures aux températures de dégradation, mais cela pourrait quand même affecter les propriétés du mélange. La vitesse de refroidissement n'est pas contrôlée après le mélange et après le pressage des échantillons. Cela influence les propriétés, particulièrement celles des mélanges avec du PEEK, car il s'agit d'un polymère semi-cristallin. Ainsi, le taux de cristallisation et la taille des cristallites peuvent influencer le positionnement des additifs dans ces mélanges.

Lors du déchiquetage d'un composé dans le mélangeur interne ou lors d'un mélange dans la micro-extrudeuse, il reste toujours quelques saletés ou d'anciens polymères dans ces machines.

Bien que ces dernières soient lavées avec soin entre toutes les utilisations, il reste inexorablement des résidus qui peuvent contaminer les mélanges.

Le contact entre les électrodes et l'échantillon peut avoir été moins bon pour certains tests. Bien que ceux-ci aient été plaqués d'or pour réduire cet effet, les échantillons ne sont pas parfaitement lisses, ce qui pourrait affecter l'aire de contact et, conséquemment, la transmission de charge d'une électrode à l'autre, se traduisant par une conductivité plus faible que s'il y avait un contact complet.

CONCLUSION

Les arcs électrostatiques que peuvent causer l'environnement spatial à l'intérieur d'un matériau isolant ou entre les matériaux possédant des conductivités différentes constituent une des principales causes de défaillances ou de problèmes pour les engins spatiaux. Afin de protéger le prototype de rover développé par le groupe CREPEC Vision avec un châssis en thermoplastique, la présente démarche visait à augmenter la conductivité de polymères haute performance (PEEK et PEI) à l'aide d'additifs conducteurs. L'objectif était de dépasser le seuil de conduction minimal de $10^{-11} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, puisqu'en théorie, les charges induites par les radiations ne s'accumulent pas au-delà de ce seuil.

Pour y arriver, une méthodologie tenant compte des contraintes de fabrication que l'équipe s'est fixées a été développée. Les polymères ont été préalablement séchés, puis des mélanges maîtres avec 15 % massique d'additifs ont été fabriqués dans un mélangeur interne. D'autres plus petits mélanges, contenant des concentrations allant de 0 % à 15 % pour le noir de carbone ainsi que pour le graphène, ont ensuite été fabriqués dans une micro-extrudeuse, à partir de mélange maître et de polymère pur. Des échantillons ont été pressés, puis ils ont été plaqués d'or pour assurer un bon contact pendant le test de spectroscopie diélectrique à large bande, grâce auquel les propriétés diélectriques de chacun des mélanges ont été mesurées.

Les résultats obtenus montrent que le seuil de percolation du NDC est plus bas que le seuil du GN dans le PEEK : alors que le premier se situe autour de 12 % massique, le deuxième se situe à environ 14 %. Cela est probablement imputable à la méthode employée. Le haut cisaillement dans le mélangeur interne ainsi qu'à l'intérieur de la micro-extrudeuse est sûrement moins dommageable pour le NDC, dont la forme est plus sphérique, que pour le GN, qui se présente sous forme de flocons. Ces flocons peuvent casser ou plier pendant les manipulations. De plus, leur orientation est critique pour obtenir un réseau conducteur, or cette orientation ne peut être contrôlée avec le mode de fabrication actuel.

Le NDC avait aussi une meilleure conduction après le seuil de percolation, c'est-à-dire plus de $10^{-8} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, contre plus de $10^{-10} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ pour le GN. Le noir de carbone est donc un meilleur additif en fonction de l'objectif recherché. Celui-ci pourrait être utilisé dans le PEEK ou le PEI à une concentration de 12 % massique en vue de dissiper les charges.

Malheureusement, en disposant seulement de filament contenant 10,4 % massique de fibres de carbone, il était impossible de tester de plus grandes concentrations. Pour la construction du châssis, l'équipe CREPEC Vision analyse actuellement la possibilité d'utiliser un autre composé pour ses propriétés mécaniques. Il s'agit de PEEK contenant 20 % de fibres de carbone courtes. Il serait pertinent de tester les propriétés diélectriques de ce polymère : à cette concentration, les fibres courtes pourraient rendre le PEEK assez conducteur pour éviter tout problème causé par les charges internes.

La présente étude a exploré une des options possibles pour que les polymères constituent de meilleurs boucliers face aux charges présentes dans l'environnement lunaire. Les personnes intéressées à poursuivre dans cette voie sont invitées à lire les recommandations à la section suivante. Cette étude a révélé qu'il était possible d'augmenter les propriétés diélectriques des polymères dans la perspective de les rendre assez conducteurs pour remplacer les châssis d'aluminium utilisés actuellement. De nombreuses innovations sont certainement possibles dans le domaine des composites à base de polymères haute performance.

RECOMMANDATIONS

Cette section s'adresse à toute personne souhaitant poursuivre l'étude entamée dans ce mémoire. Tel que mentionné précédemment, plusieurs mesures n'ont pu être réalisées en raison du contexte de la pandémie actuelle.

Afin de valider les propriétés protectrices des mélanges pendant la nuit lunaire, il serait prioritaire de faire plus de tests sur les échantillons dans une plage de basses températures, allant de -150 °C à 0 °C. Ce serait particulièrement pertinent pour les échantillons au-dessus du seuil de percolation afin de voir l'effet de ces températures glaciales sur la conductivité.

Par la suite, il serait intéressant de fabriquer davantage d'échantillons s'approchant des seuils de percolation, afin de définir ceux-ci avec plus d'exactitude.

Aussi, dans le but de mesurer avec plus de justesse les propriétés mécaniques des mélanges, il serait intéressant d'imprimer des éprouvettes de traction, puisque cette méthode de fabrication affecte les propriétés mécaniques des pièces qui seront employées pour le rover.

Si un jour les mélanges élaborés sont employés pour de longues missions spatiales, il serait pertinent de s'assurer que ces derniers ne seront pas trop affectés par la photodégradation, car les rayons UV peuvent détériorer les chaînes de polymères. Bien que le NDC soit reconnu pour ralentir ce processus, il serait sage de tester les mélanges dans un concentrateur solaire pour confirmer que la durée de vie de ceux-ci est adéquate.

Au moment de la conception du rover, plus particulièrement de la protection contre les radiations, il serait judicieux de prendre en compte l'intensité de l'activité du cycle solaire (cycle de 11 ans) ainsi que la localisation de la mission sur la Lune (latitude).

Pour toute question ou pour avoir accès aux données brutes des expériences, il est possible de contacter l'auteur de ce mémoire par courriel : felix.leblanc.2@ens.etsmtl.ca.

ANNEXE I

MASSE DES ÉCHANTILLONS RÉALISÉS

Le tableau ci-dessous montre la masse des différents composants dans les échantillons de PEI-NDC, PEEK-NDC et PEEK-GN. Les échantillons ont tous une masse de 5 g.

Tableau-A I-1 Masse de mélange maître utilisé dans les échantillons

% Massique d'additif	Masse d'additif (g)	Masse de mélange maître (g)	Masse de polymère pur (g)
0	0	0,00	5,00
2	0,1	0,67	4,33
4	0,2	1,33	3,67
6	0,3	2,00	3,00
8	0,4	2,67	2,33
10	0,5	3,33	1,67
12	0,6	4,00	1,00
14	0,7	4,67	0,33
15	0,75	5,00	0,00

Exemple de calcul de la masse de mélange maître :

$$M_{mm} = M_{NDC} \div \%_{mm}$$

$$M_{mm} = 0,2g \div \frac{15}{100}$$

$$M_{mm} = 1,33g$$

ANNEXE II

CALCUL DE LA CONCENTRATION DE FIBRE DE CARBONE DANS LE PEI

Selon la fiche technique du « CarbonX™ Carbon Fiber Ultem™ PEI 3D Printing Filament » de *3DXTECH*, la densité de ce filament est de 1,31 g/cm³.

On fait l'hypothèse que la fibre de carbone a une densité de 1,79 g/cm³ comme mentionné sur le site : <https://gernitex.com/fr/ressources/fibre-de-carbone-proprietes/> consulté le 2 septembre 2020.

La deuxième hypothèse est que le PEI est du Ultem 1010 avec une densité de 1,27 g/cm³ tel que mentionné sur le site : <https://filament2print.com/gb/advanced/892-pei-ultem-1010.html> consulté le 2 septembre 2020.

On peut donc faire le calcul suivant :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{\rho_A} + \frac{1-x}{\rho_B}$$

$$\frac{1}{1,31 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = \frac{x}{1,27 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + \frac{1-x}{1,79 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$x = 0,895$$

Ce qui veut dire que le PEI représente 89,5 % de la masse du filament et que la fibre de carbone représente la portion de 10,5 % restante.

ANNEXE III

PHOTOS PRISES AVEC LA MEB D'ÉCHANTILLONS DE PEI-NDC

Toutes les images de l'annexe III ont été prises selon la méthodologie expliquée à la section 2.9 (p. 34).

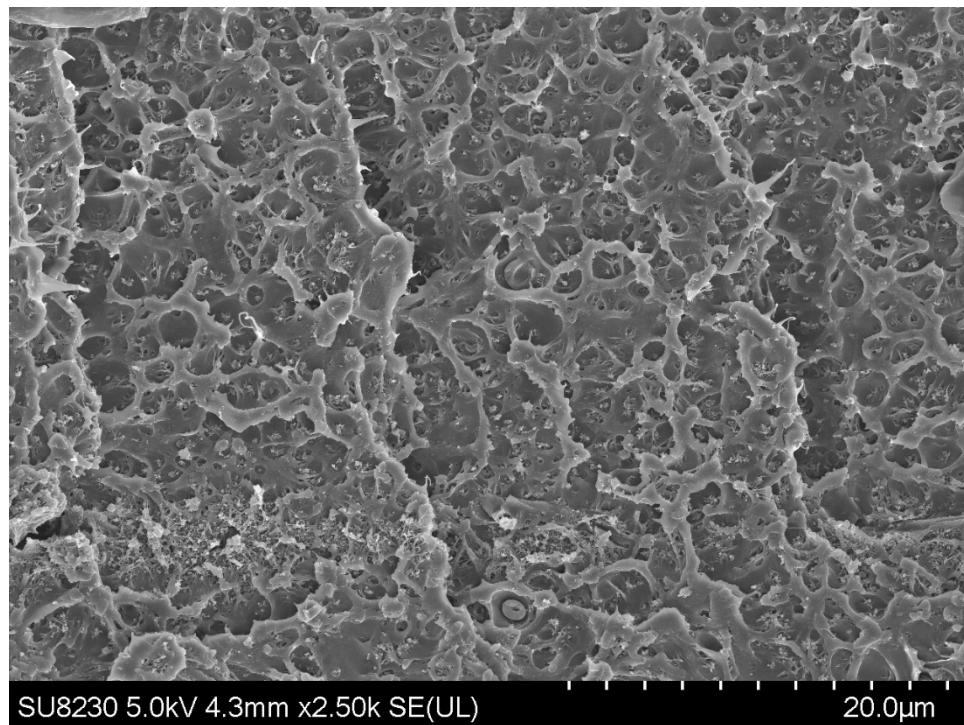


Figure A III-1 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 4 % échelle de 20 μm

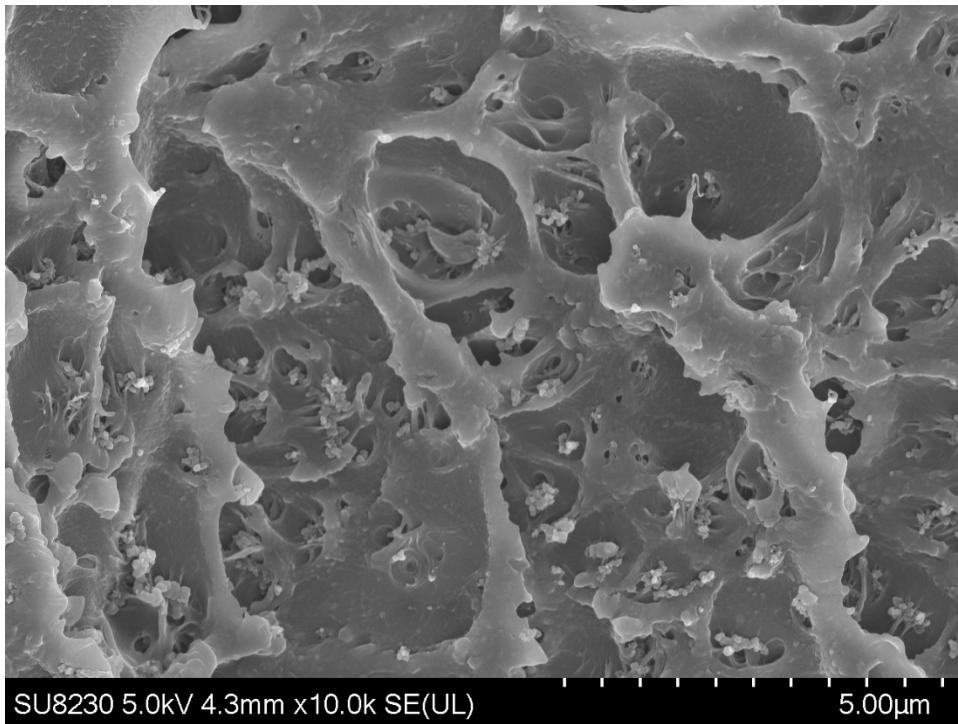


Figure A III-2 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 4 % échelle de 5 μm

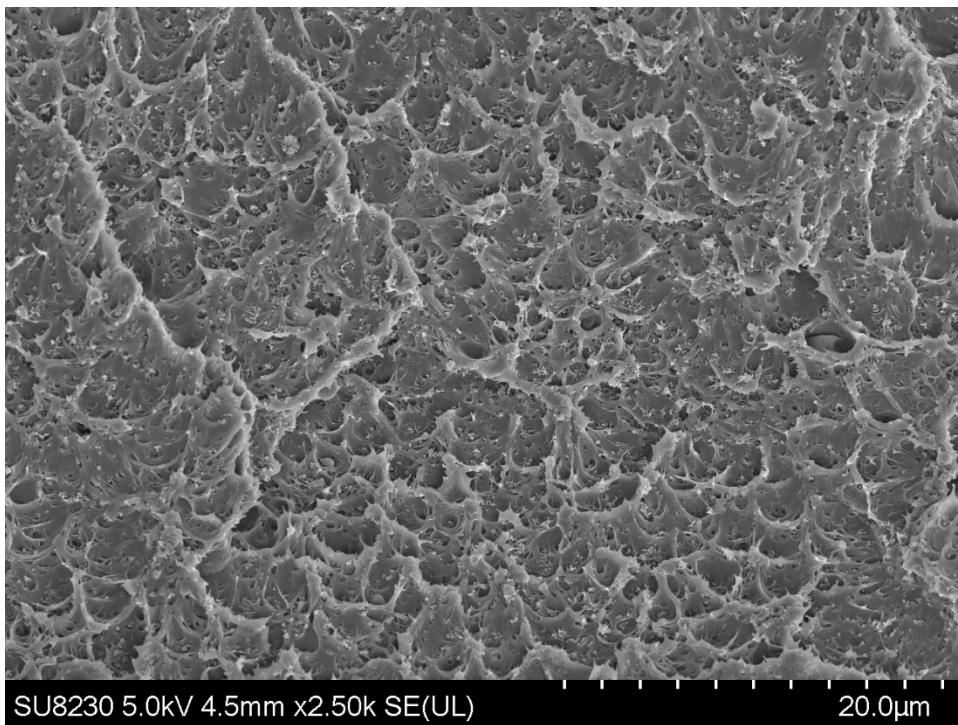


Figure A III-3 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 6 % échelle de 20 μm

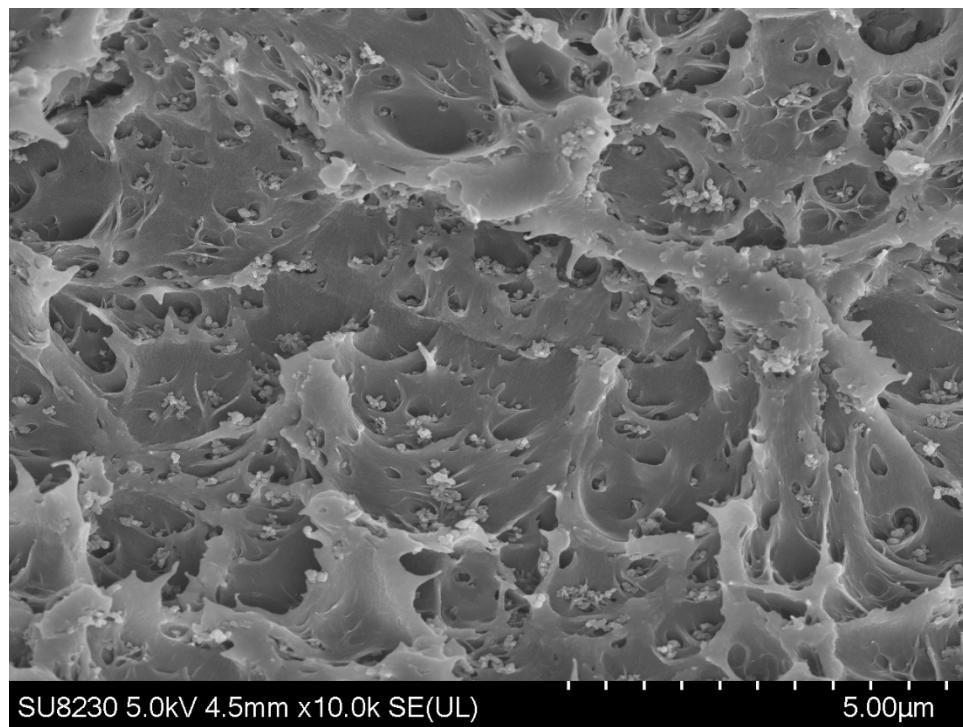


Figure A III-4 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 6 % échelle de 5 μm

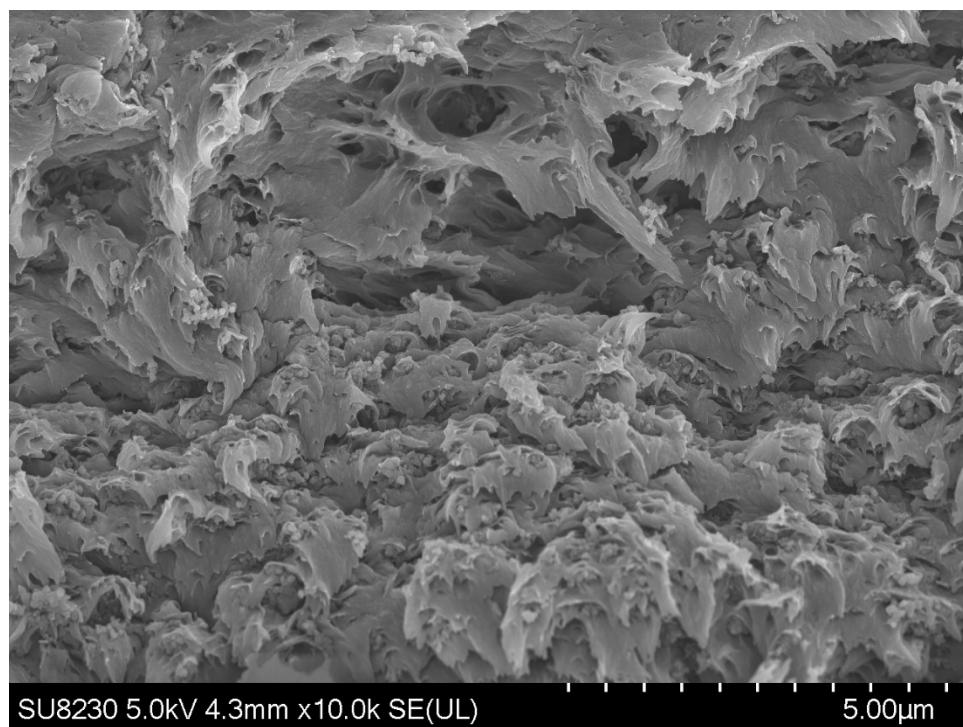


Figure A III-5 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 8 % échelle de 5 μm

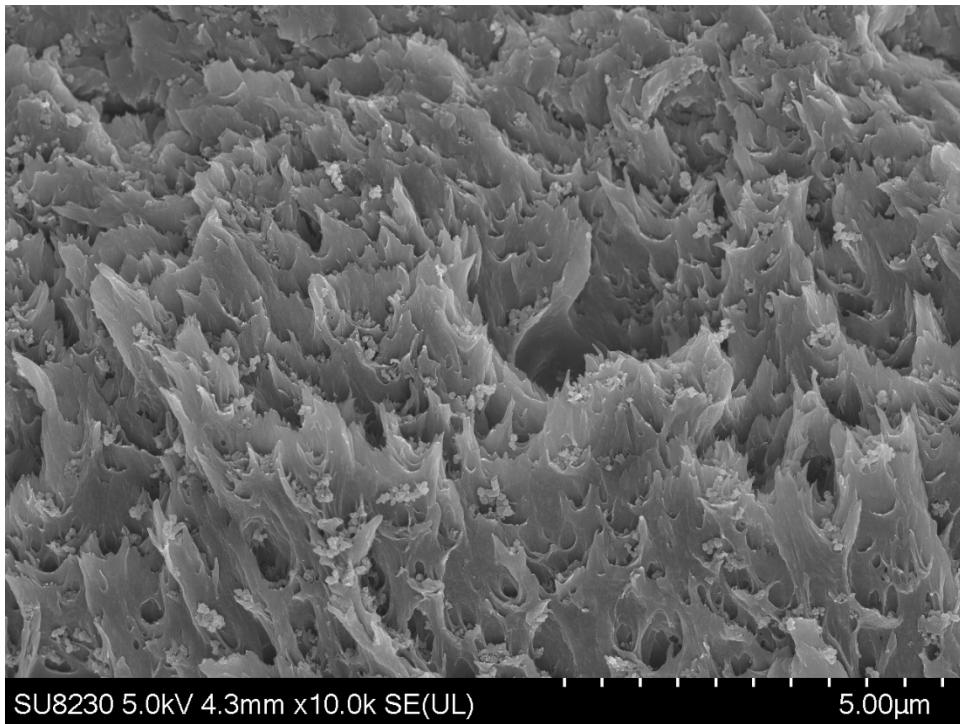


Figure A III-6 Deuxième photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 8 % échelle de 5 μm

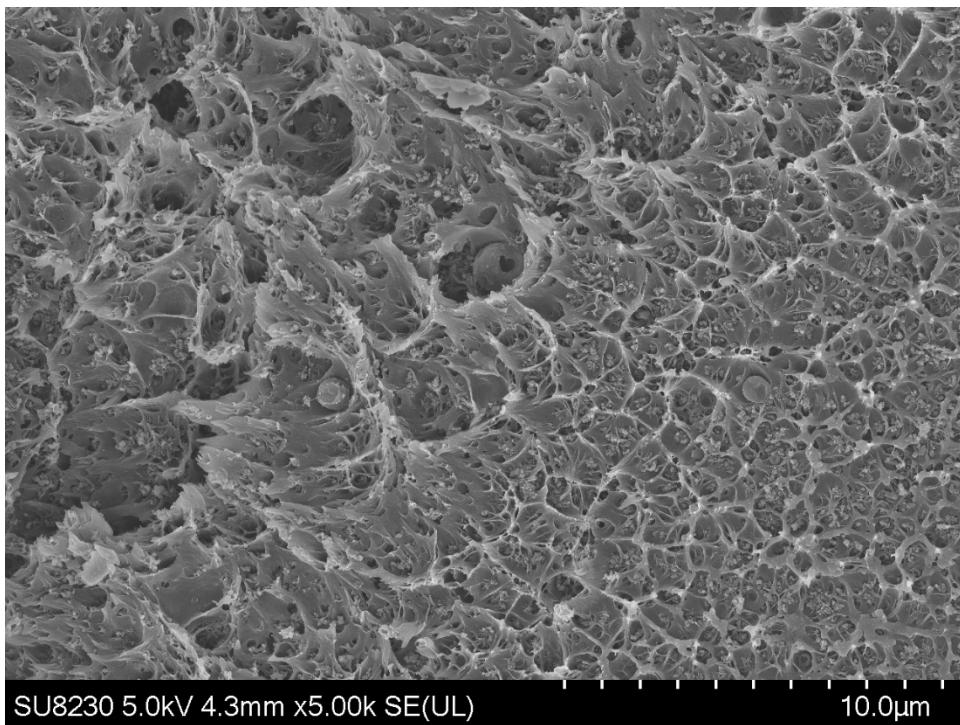


Figure A III-7 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 10 % échelle de 10 μm

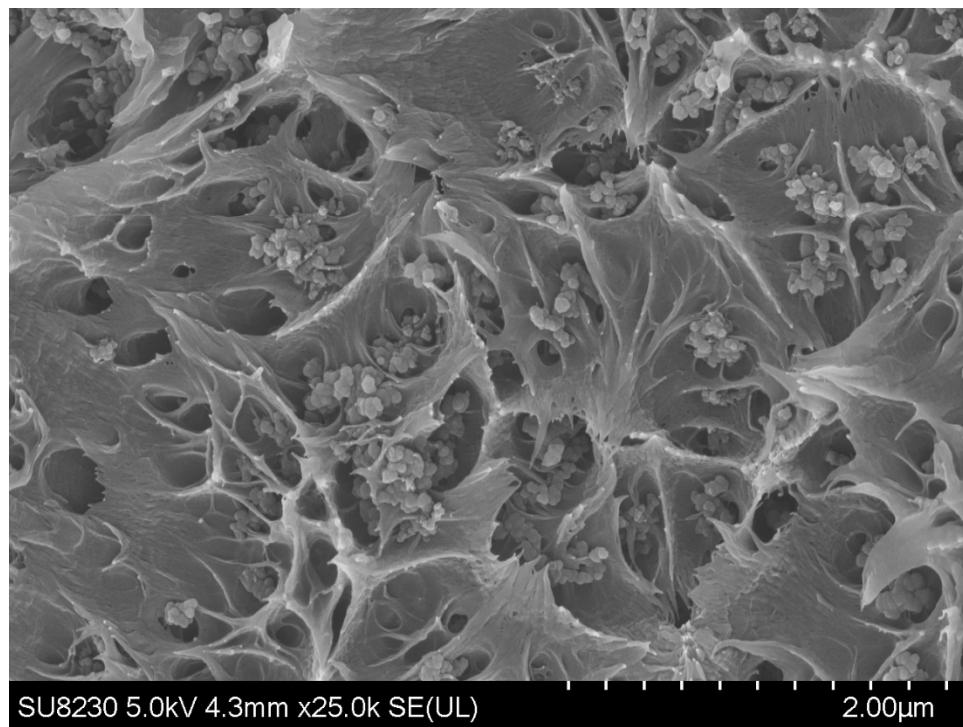


Figure A III-8 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 10 % échelle de 2 μm

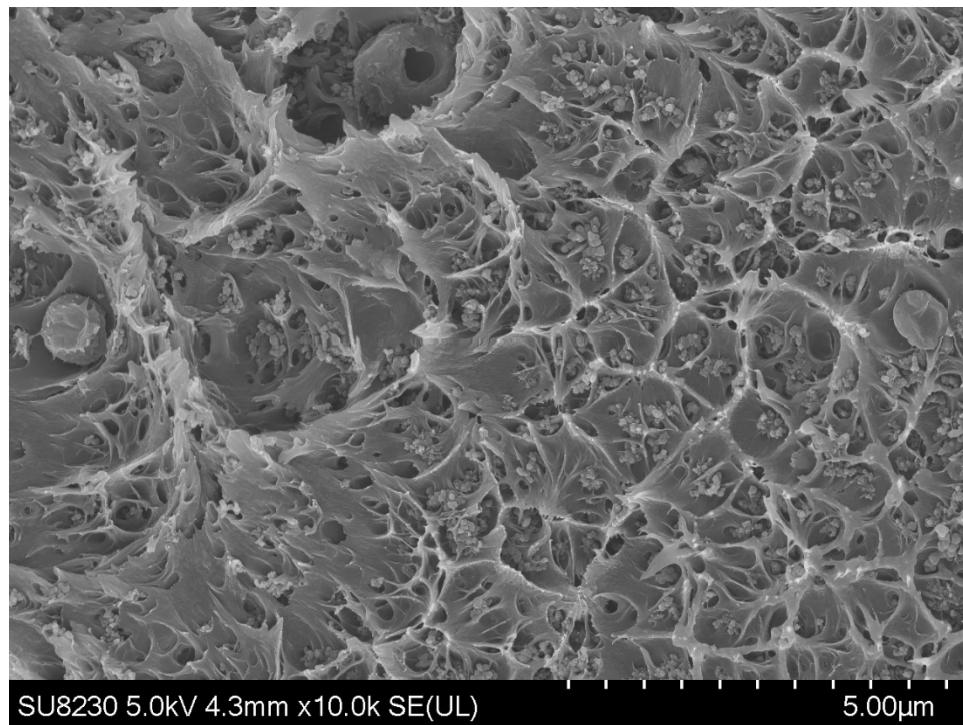


Figure A III-9 Photo prise à l'aide de la MEB d'un échantillon de PEI-NDC 10 % échelle de 5 μm

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bedingfield, K. L., R. D. Leach et M. B. Alexander (1996). *Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment* NASA Ref. Publ. 1390.
- Carbon, Birla. (2014). *How to get the best from your carbon black:* <https://slideum.com/doc/33949/t3b--how-to-get-the-best-from-your-carbon-black>
Consulté le 14 septembre 2020
- Chiggiato, P. (s.d.). Dégazage des solides en ultravide : quelques notions de base pour les techniciens du CERN, 34.
- Garrett, H. B., & Whittlesey, A. C. (2012). *Guide to Mitigating Spacecraft Charging Effects: Garrett/Charging Effects*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9781118241400>
- Ghasemi-Kahrizsangi, A., Neshati, J., Shariatpanahi, H., & Akbarinezhad, E. (2015). Improving the UV degradation resistance of epoxy coatings using modified carbon black nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 85, 199-207.
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.04.011>
- Griseri, (2009) *Behavior of Dielectrics in a Charging Space Environment and Related Anomalies in Flight*. Université de Toulouse, LAPLACE
- Halekas, J. S., Delory, G. T., Brain, D. A., Lin, R. P., Fillingim, M. O., Lee, C. O., ... Hudson, M. K. (2007). Extreme lunar surface charging during solar energetic particle events. *Geophysical Research Letters*, 34(2). <https://doi.org/10.1029/2006GL028517>
- Henry B. Garrett et Albert C. Whittlesey, (2011) *Guide to Mitigating Spacecraft Charging Effects* Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology
- Huang, X. (2009). Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*, 2(4), 2369-2403.
<https://doi.org/10.3390/ma2042369>
- J.H.Adams, Jr, R Silberberg et C.H. Tsao (1981) *Cosmic ray effect on microelectronics, Part I: the near-Earth particule environment*. Naval research laboratory, Washington D.C.
- Jan, R., Habib, A., Akram, M. A., Ahmad, I., Shah, A., Sadiq, M., & Hussain, A. (2017). Flexible, thin films of graphene–polymer composites for EMI shielding. *Materials Research Express*, 4(3), 035605. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa6351>
- Kremer, F., & Schönhals, A. (2002). *Broadband Dielectric Spectroscopy*. (S.1.) : Springer Science & Business Media. (Google-Books-ID: sdG4ywL3qMsC).

- Kumar, S., Rath, T., Mahaling, R. N., Reddy, C. S., Das, C. K., Pandey, K. N., ... Yadaw, S. B. (2007). Study on mechanical, morphological and electrical properties of carbon nanofiber/polyetherimide composites. *Materials Science and Engineering: B*, 141(1), 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.06.002>
- Kurusu, R. S., Helal, E., Moghimian, N., David, E., & Demarquette, N. (2018). The Role of Selectively Located Commercial Graphene Nanoplatelets in the Electrical Properties, Morphology, and Stability of EVA/LLDPE Blends. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(9), 1800187. <https://doi.org/10.1002/mame.201800187>
- La charte d'éthique et de déontologie du groupe Le Monde. (2010, 3 novembre). *Le Monde.fr*. Repéré à https://www.lemonde.fr/actualite-medias/article/2010/11/03/la-charte-d-ethique-et-de-deontologie-du-groupe-le-monde_1434737_3236.html
- Larousse, É. (s.d.). Définitions : rayonnement - Dictionnaire de français Larousse. Repéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/rayonnement/66761>
- Lunar Temperature - Lunarpedia. (s.d.). Repéré à http://lunarpedia.org/index.php?title=Lunar_Temperature
Consulté le 14 juillet 2020
- Marsden, A. J., Papageorgiou, D. G., Vallés, C., Liscio, A., Palermo, V., Bissett, M. A., ... Kinloch, I. A. (2018a). Electrical percolation in graphene–polymer composites. *2D Materials*, 5(3), 032003. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aac055>
- Moon Fact Sheet. (s.d.). Repéré à <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>
Consulté le 18 novembre 2019
- Nemoto, T., Takagi, J., & Ohshima, M. (2010). Nanocellular foams—cell structure difference between immiscible and miscible PEEK/PEI polymer blends. *Polymer Engineering & Science*, 50(12), 2408-2416. <https://doi.org/10.1002/pen.21766>
- Outgassing Materials Search Results. (s.d.-b). Repéré à <https://outgassing.nasa.gov/cgi/uncgi/search/search.sh>
Consulté le 7 septembre 2020
- PEI (ULTEM 1010) | Filament2Print. (s.d.). Repéré à <https://filament2print.com/fr/avances/892-pei-ultem-1010.html>
Consulté le 28 septembre 2019
- Peres, N. M. R., & Ribeiro, R. M. (2009). FOCUS ON GRAPHENE. *New Journal of Physics*, 11(9), 095002. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/9/095002>

Polyetherimide - an overview | ScienceDirect Topics. (s.d.). Repéré à <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polyetherimide>

Progression du cycle solaire | Activité solaire. (s.d.). *SpaceWeatherLive.com*. Repéré à <https://spaceweatherlive.com/fr/activite-solaire/cycle-solaire.html>
Consulté le 12 décembre 2020

Stubbs, T. J., Vondrak, R. R., & Farrell, W. M. (s.d.). IMPACT OF DUST ON LUNAR EXPLORATION, 4.

Townsend, L. W. (2005). Implications of the space radiation environment for human exploration in deep space. *Radiation Protection Dosimetry*, 115(1-4), 44-50. <https://doi.org/10.1093/rpd/nci141>

Unfilled PEI :: MakeItFrom.com. (s.d.). Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Unfilled-PEI>

Yang, Ohki, Hirai, Naoshi, Shugo. (2017). *Aging of poly(ether ether ketone) by heat and gamma rays — Its degradation mechanism and effects on mechanical, dielectric and thermal properties*. Polymer Degradation and Stability.

