

# L'électricité de nos forêts

---

Présenté par

**David Thériault et Alexis Fleury**



# Les batteries lithium-ions (BSI)

**Avec le recul des carburants fossiles, le stockage d'énergie devient essentiel pour soutenir la transition énergétique. Les batteries, notamment lithium-ion, jouent un rôle clé en facilitant l'intégration des énergies renouvelables et l'électrification des transports**

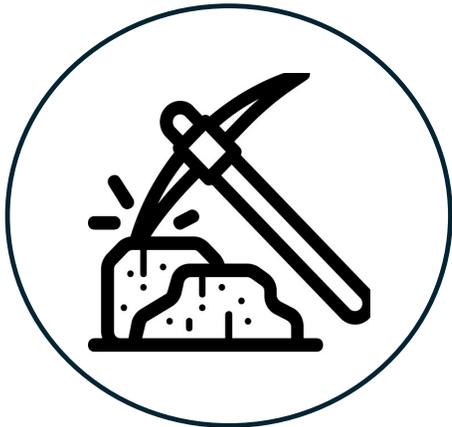


©Appel à Recycler®, 2023

# Problématique

---

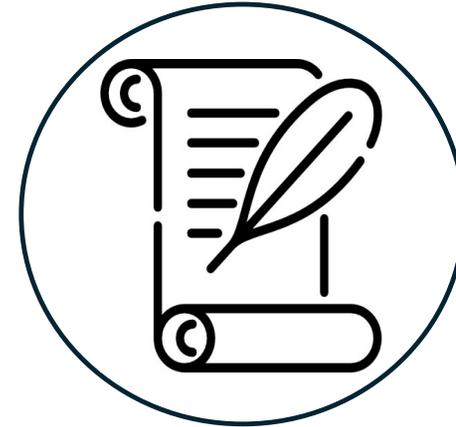
**Les ressources  
utilisées dans les  
BSI sont de plus  
en plus rares**



**Possibles tensions  
géopolitiques pour  
obtenir le contrôle  
des mines**



**Non-respect des  
droits humains  
dans les mines**



**Faibles coûts**



**Ressource  
abondante**



Face aux limites des batteries lithium-ion, les batteries sodium-ion (BSI) émergent comme une alternative prometteuse, grâce à l'abondance et au faible coût du sodium. Leur développement offre des perspectives intéressantes pour le stockage stationnaire et la mobilité électrique.



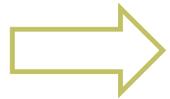
La batterie sodium-ion est-elle une solution viable?

**Meilleur pour  
l'environnement**



# Problématique

Un des principaux défis reste l'anode : le graphite, couramment utilisé dans les batteries lithium-ion, est inefficace avec le sodium. Le carbone dur est alors privilégié, mais il provient souvent de ressources non renouvelables.



**La solution: Le carbone dur**



**Fabricable à partir de biomasse**

Pour concilier performance et durabilité, ce travail explore la conception d'anodes à base de carbone dur issu de biomasse forestière, une solution innovante et plus respectueuse de l'environnement.



# Objectifs

---



- Fabriquer une anode à base de carbone dur dérivé de la biomasse forestière

- Identifier les types de biomasse les plus efficaces

- Obtenir des données physicochimiques et électrochimiques

# Biomasses



Les 3 biomasses  
utilisées dans la  
fabrication du  
carbone dur :



**Cellulose**



**Écorce de sapin**



**Lignine**

# Hypothèses

---



**Une anode  
fonctionnelle sera  
produite**



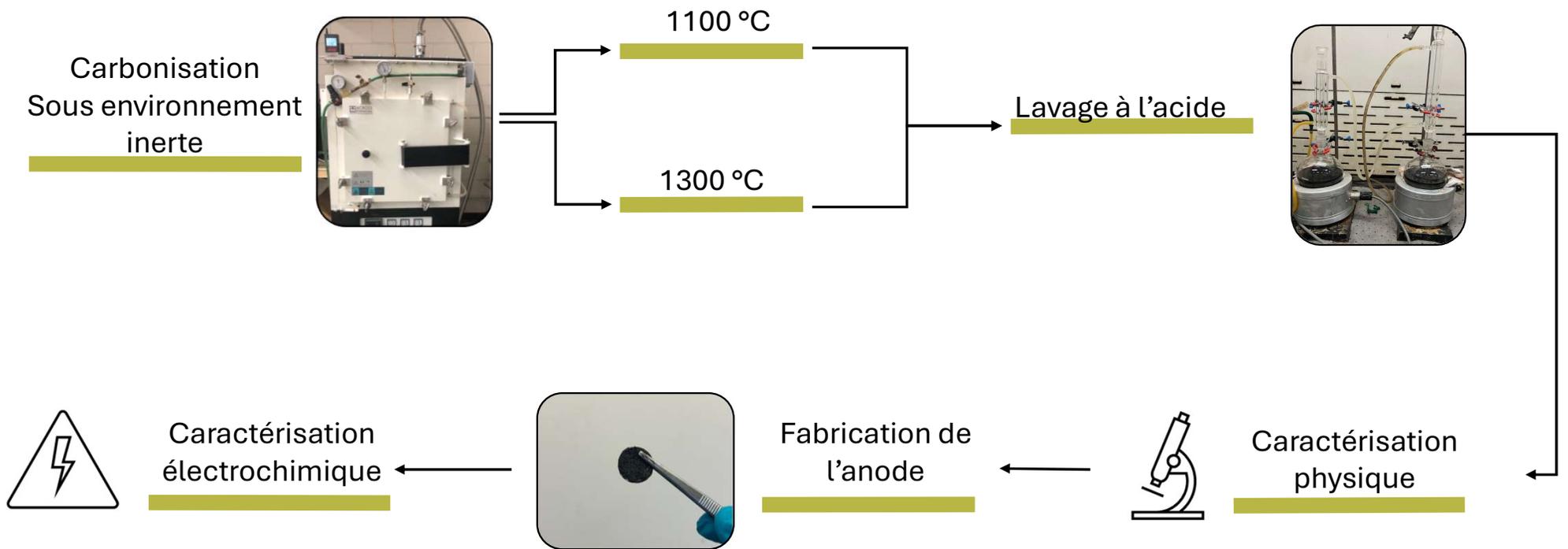
**La lignine aura  
de meilleur  
résultat que le  
sapin**



**Le procédé de  
lavage**



# Méthodologie



# Analyse et résultats – Rendement massique

---



Pesée initiale sous  
forme de biomasse



Carbonisation sous  
atmosphère inerte à  
1100 °C et 1300 °C

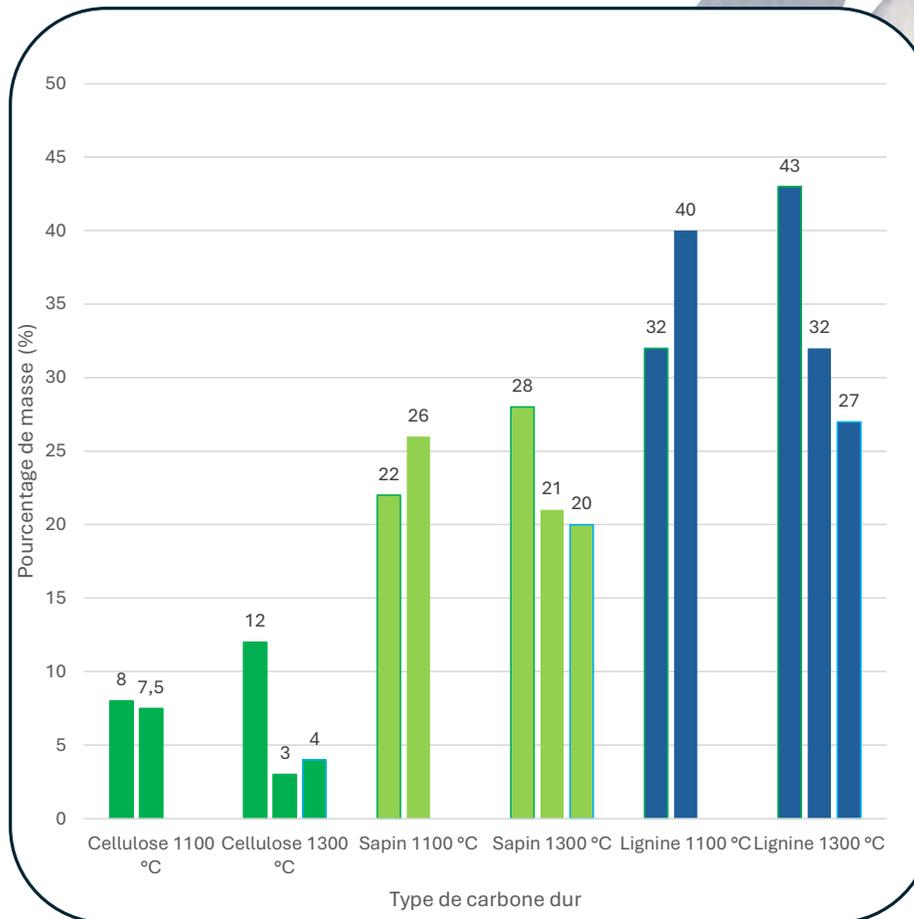


Pesée finale sous  
forme de carbone dur



# Analyse et résultats – Rendement massique

Rendement massique des  
différents types de  
carbone dur



# Analyse et résultats – Rendement massique

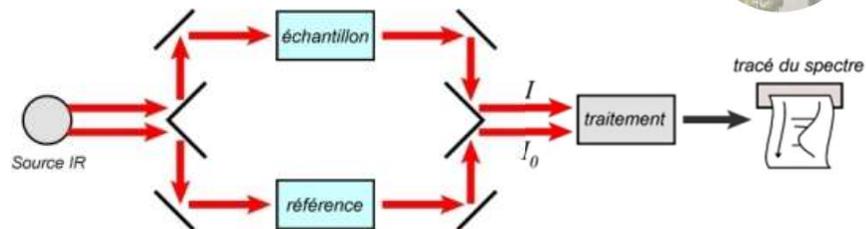
---

Le rendement massique des biomasses a été évalué en comparant leur masse avant et après carbonisation. Ce critère est essentiel pour déterminer la viabilité industrielle d'un matériau : plus le rendement est élevé, plus il est intéressant à produire. Parmi les biomasses testées, la lignine a montré le meilleur rendement, ce qui s'explique par sa haute teneur en carbone et sa faible production de gaz volatils lors de la carbonisation. L'écorce de sapin présente un rendement intermédiaire, attribuable à sa composition hétérogène incluant lignine, hémicellulose et cellulose, ces deux derniers composants étant plus volatils à haute température. En revanche, la cellulose seule s'est révélée peu efficace, en raison de sa forte instabilité thermique. Ces observations confirment que les biomasses riches en lignine sont les plus prometteuses pour la production de matériaux carbonés. Des ajustements expérimentaux, comme l'utilisation d'un flux d'azote constant, pourraient améliorer la reproductibilité des résultats.

# Analyse et résultats – Spectroscopie



Détermination de la composition d'un échantillon



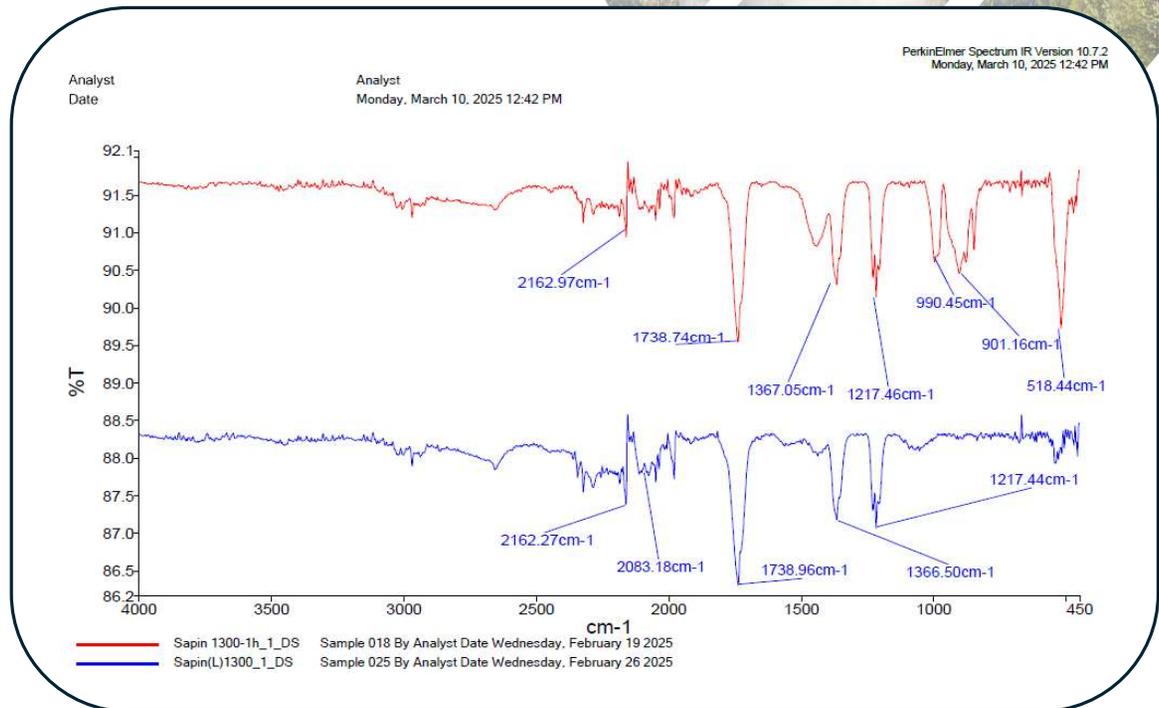
Rayons infrarouges dirigés vers la matière à analyser



# Analyse et résultats – Spectroscopie

Modification des spectres après lavage qui semble indiquer une élimination des impuretés – **Réussite du procédé de lavage**

Disparition de liaison après la carbonisation (groupe OH) – **Réussite de la carbonisation**



# Analyse et résultats – L'analyse élémentaire

---

L'analyseur  
élémentaire permet  
d'obtenir le :



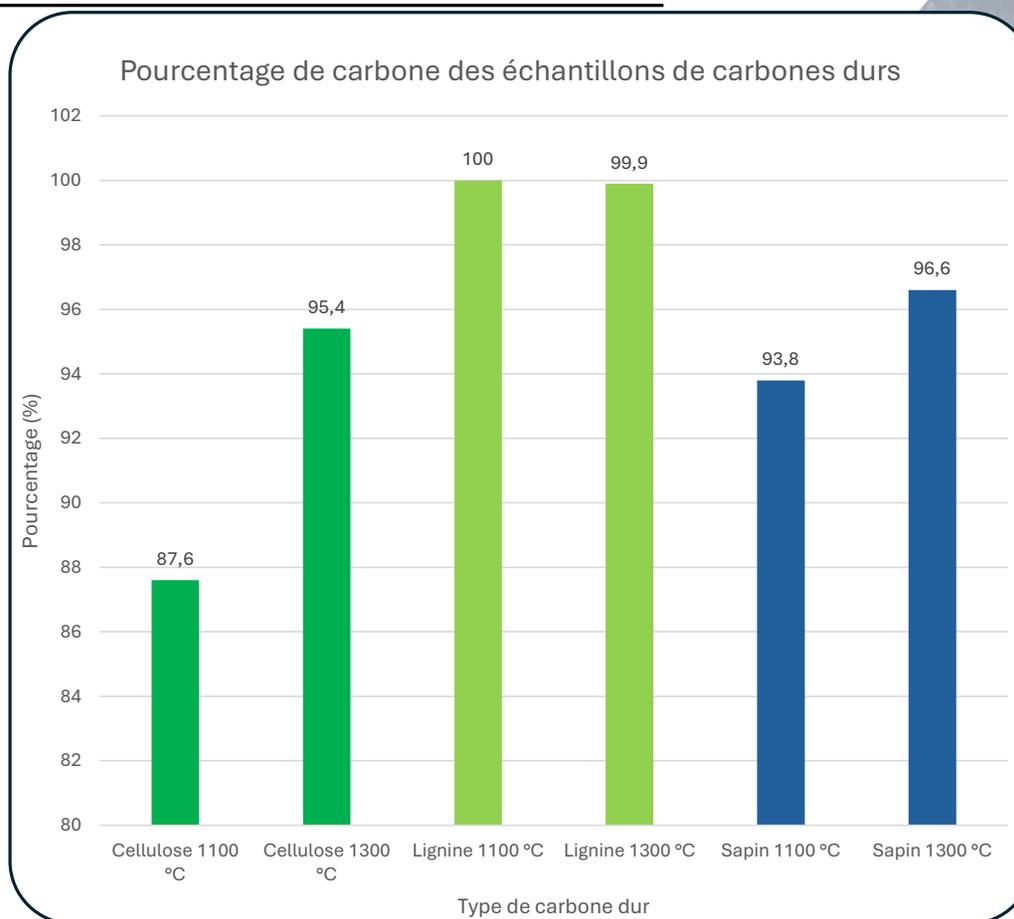
Taux de **carbone**

Taux d'**hydrogène**

Taux d'**azote**



# Analyse et résultats – L'analyse élémentaire



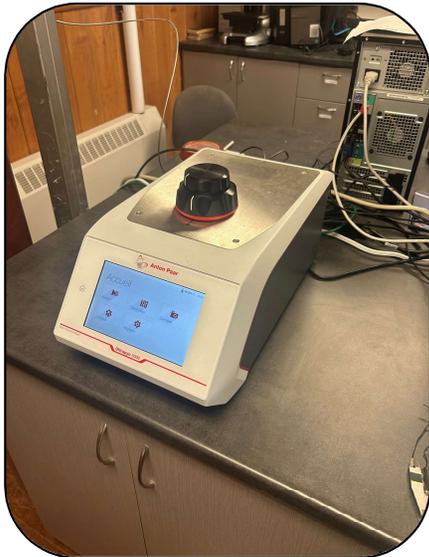
# Analyse et résultats – L'analyse élémentaire

---

Puisque le pourcentage de carbone est lié aux propriétés électrochimiques du carbone dur, une analyse élémentaire est pertinente et a donc été réalisée sur les échantillons à 1100 °C et 1300 °C des trois types de biomasse. Pour les échantillons à 1100 °C, les résultats ont montré que la lignine avait le plus grand taux en carbone, suivit de l'écorce de sapin et de la cellulose. Les taux de carbone élevés confirment la carbonisation des biomasses, ce qui est un précurseur de la réussite pour la conversion des biomasses en carbone dur. Les échantillons à 1300 °C présentent des teneurs en carbone plus élevées pour la plupart des échantillons. La lignine présente toujours un plus grand pourcentage de carbone, mais légèrement inférieur que celui à 1100 °C. Il y a cependant une augmentation dans le pourcentage de l'écorce de sapin et de la cellulose, avec respectivement 96.6 % et 95.4 %. Cela représente une augmentation de 2.8 % et 7.8 %. Cela montre qu'il est préférable de synthétiser le carbone dur à partir d'écorce de sapin à des températures aux alentours de 1300 °C.

# Analyse et résultats – Densité squelettique

---



Pycnomètre

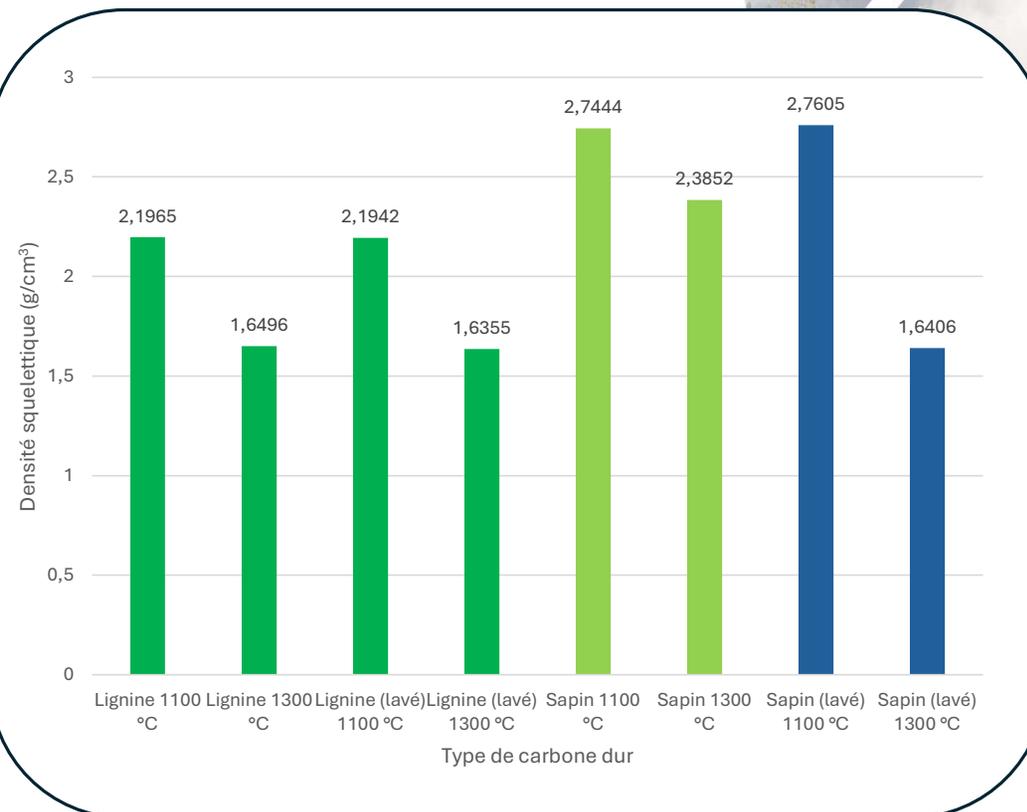


La densité squelettique  
est en corrélation avec la  
conductivité du matériau



# Analyse et résultats – Densité squelettique

Densité squelettique des  
différents types de carbone dur



# Analyse et résultats – Densité squelettique

---

Des tests de densité squelettique ont été menés à l'aide d'un pycnomètre sur la lignine et l'écorce de sapin afin d'évaluer leur potentiel comme matériaux d'anode pour les batteries sodium-ion. Cette densité est essentielle, car elle permet d'estimer la quantité de matière solide par volume, un facteur clé pour optimiser la conductivité électrique, la capacité de stockage et la cristallinité des carbones durs. Les mesures pour la cellulose ont été écartées, car sa faible masse a généré des écarts-types trop élevés. Les résultats à 1100 °C et 1300 °C indiquent une baisse de densité avec la température, traduisant une dégradation thermique. Après lavage, la densité augmente légèrement, suggérant l'élimination d'impuretés, sauf pour la lignine à 1300 °C. Certaines biomasses présentent une densité comparable ou supérieure à celle du graphite ( $2,267 \text{ g/cm}^3$ ), et l'écorce de sapin se distingue comme un candidat prometteur. Des ajustements méthodologiques sont toutefois nécessaires, notamment pour mieux prendre en compte les pores fermés. Souhaites-tu que je prépare aussi une version pour une présentation orale ou une slide ?

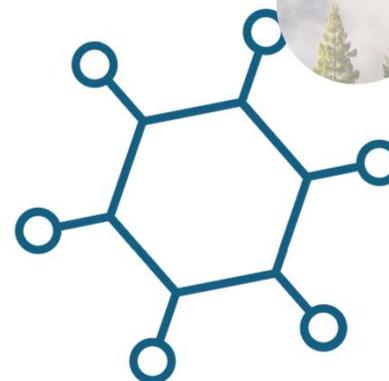
# Causes d'erreurs

---



Cellulose 1300 °C #2

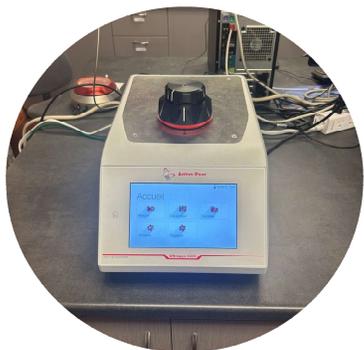
- **Possibilité de combustion de certains échantillons**



- **Prolongement de certains échantillons dans le four lors de la synthèse**

# Améliorations

---



**Méthodologie  
pycnomètre**



**Analyse BET**



**Four à tube**



**Balayage à  
rayon X**



**Spectroscopie  
Raman**



# Conclusions

---

**Sujet :** Fabrication d'une anode

**Retombées :** Permettrait d'ouvrir la voie à des solutions durables pour le stockage d'énergie

Identifier les types de biomasses les plus performants  
– **Atteint** – La lignine

Obtenir des données physicochimiques et électrochimiques - **Partiellement atteint** – Les données électrochimiques sont toujours à obtenir.

Faire une anode performante - **Partiellement atteint** – Une anode a été produite mais les tests électrochimiques vont venir confirmer les performances



©David Thériault, 2025

# Conclusions

---

Les prochaines étapes incluront des tests électrochimiques approfondis afin d'évaluer le potentiel du carbone dur dans les applications de stockage d'énergie, contribuant ainsi à la transition vers des solutions énergétiques durables. Les tests physicochimiques ont montré qu'il y a un potentiel de bonnes performances électriques, surtout à partir de la lignine et de l'écorce de sapin.



Anode en carbone dur, ©David Thériault, 2025

# Remerciements

---

- Nous remercions le centre collégial de transfert de technologie, le SEREX,
- Un merci particulier à **Jenny Lapierre**, pour les ressources et l'expertise mises à disposition.



# Références

---

- *How Sodium-Ion Batteries May Challenge Lithium*, 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=RQE56ksVBB4>.
- <https://drive.google.com/drive/folders/1-GmkWwxw6i33QhHyhu0ZHg2Hgih6t1r>.
- Carbon, East. « Tout sur la densité du graphite expliqué - East Carbon ». *Carbone de l'Est* (blog), 30 septembre 2024. <https://www.eastcarb.com/fr/densite-du-graphite/>.
- « BET Theory | Anton Paar Wiki ». Consulté le 21 février 2025. <https://wiki.anton-paar.com/ca-fr/theorie-bet/>.
- Particle Technology Labs. « BET Specific Surface Area Testing ». Consulté le 22 mars 2025. <https://particletechlabs.com/analytical-testing/bet-specific-surface-area/>.
- GHIMBEU, Camelia Matei, Biao ZHANG, Alicia MARTINEZ DE YUSO, Benedicte RETY et Jean-Marie TARASCON. « Valorizing low cost and renewable lignin as hard carbon for Na-ion batteries: Impact of lignin grade ». *Carbon* 152 (2019): 520-31.
- « How Sodium Could Change the Game for Batteries ». *MIT Technology Review*. Consulté le 17 février 2025. <https://www.technologyreview.com/2023/05/11/1072865/how-sodium-could-change-the-game-for-batteries/>.
- *How Sodium-Ion Batteries May Challenge Lithium*, 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=RQE56ksVBB4>.
- Hwang, Jang-Yeon, Seung-Taek Myung, et Yang-Kook Sun. « Sodium-Ion Batteries: Present and Future ». *Chemical Society Reviews* 46, n° 12 (2017): 3529-3614. <https://doi.org/10.1039/C6CS00776G>.
- Jache, Birte, et Philipp Adelhelm. « Graphite As Anode Material for Sodium-Ion Batteries: Making an Inactive Electrode Active to Compete with Li-Ion Batteries ». *ECS Meeting Abstracts* MA2015-03, n° 2 (15 juillet 2015): 567. <https://doi.org/10.1149/MA2015-03/2/567>.
- Particle Technology Labs. « BET Specific Surface Area Testing ». Consulté le 22 mars 2025. <https://particletechlabs.com/analytical-testing/bet-specific-surface-area/>.
- Qin, Linna, Shoudong Xu, Zhonghua Lu, Li Wang, Liang Chen, Ding Zhang, Jinlv Tian, Tao Wei, Jiaqi Chen et Chunli Guo. « Cellulose as a novel precursor to construct high-performance hard carbon anode toward enhanced sodium-ion batteries ». *Diamond & Related Materials* 136, n° 110065 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110065>.
- Wen, Yang, Kai He, Yujie Zhu, Fudong Han, Yunhua Xu, Isamu Matsuda, Yoshitaka Ishii, John Cumings, et Chunsheng Wang. « Expanded Graphite as Superior Anode for Sodium-Ion Batteries ». *Nature Communications* 5, n° 1 (4 juin 2014): 4033. <https://doi.org/10.1038/ncomms5033>.

# Références

---

## Images

- Forêt : <https://www.lesoleil.com/2018/04/27/decouvrez-la-foret-durable-quebecoise-et-ses-nombreuses-possibilites-67809590b7f22adc271a174c05717d11/>
- « Spectroscopie Raman ». Consulté le 20 mars 2025, <https://www.bruker.com/fr/products-and-solutions/infrared-and-raman/raman-spectrometers.html>.
- Appareil XRD : <https://cemas.osu.edu/capabilities/x-ray-diffraction-xrd>.
- Four tubulaire : <https://www.fishersci.fr/fr/fr/browse/90088045/fours-tubulaires?page=1>.
- Lien image de feuille : <https://fr.vecteezy.com/art-vectoriel/3502824-main-dessin-vert-feuille-vecteur>.
- Lien image de batterie : <https://www.istockphoto.com/fr/vectoriel/une-batterie-de-voiture-power-bank-illustration-vectorielle-%C3%A9lectronique-portable-gm1462720836-496032147>.
- Lien image sel : <https://www.istockphoto.com/fr/photos/sel>.
- Le restant des images provient de la collection personnelle de David Thériault.

**MERCI!**



# Annexe

---

Tableau 1 : Résultats sommaires des différents tests sur les échantillons de carbone dur

Test	Lignine		Cellulose		Sapin	
	1100 °C	1300 °C	1100 °C	1300 °C	1100 °C	1300 °C
Perte de masse (%)	36	34	8	6	24	23
Pourcentage de carbone (%)	100,00	99,90	87,60	95,40	93,80	96,60
Densité squelettique - non lavé (g/cm <sup>3</sup> )	2,1965	1,6496	NA	NA	2,7444	2,3852
Densité squelettique - lavé (g/cm <sup>3</sup> )	2,1942	1,6355	NA	NA	2,7605	1,6406