Hemp-Derived Graphitic Porous Carbon Nanosheets as Potentially Sustainable, Multifunctional Reinforcements in Polymer Composites

A Literature-Grounded Hypothesis, Attribution Analysis, and Falsifiable Research Program

Marie-Soleil Seshat Landry

Independent Researcher; Hempoxies Division, Landry Industries
Moncton, New Brunswick, Canada
ORCID: 0009-0008-5027-3337

22 November 2026
Pre-experimental hypothesis and methods manuscript; not a report of laboratory results

Abstract

Hemp-bast-derived, interconnected, partially graphitic porous carbon nanosheets (H-GPCNs) were demonstrated by Wang, Mitlin and co-workers in 2013 as high-surface-area, conductive electrode materials for supercapacitors. That study did not experimentally establish reinforcement performance in bulk polymer composites. Building on this synthesis precedent and on prior research proposals published by Landry in 2025–2026, the present paper develops the hypothesis that chemically and morphologically engineered H-GPCNs can yield favorable combinations of fracture resistance, mechanical reinforcement, electrical functionality, processability, and environmental performance in selected epoxy and bio-epoxy matrices. The strongest rationale concerns the competition among accessible sheet area, interfacial traction, dispersion, defect density, porosity, and energy-intensive activation. Hemp origin alone cannot establish that H-GPCNs are graphene, that they outperform graphite-derived graphene, or that they are environmentally superior. We therefore specify independent material verification; a matched-filler, matched-matrix experimental design; quantitative failure criteria; and a comparative life-cycle assessment (LCA) with performance-based functional units. The paper presents no new measurements, no validated environmental inventory, and no claim of demonstrated universal superiority. Its contribution is an attribution-aware, falsifiable pathway to determine whether H-GPCNs offer a useful performance–environmental-impact advantage in carefully defined composite applications.

Keywords: hemp-derived carbon nanosheets; graphitic porous carbon; polymer nanocomposites; graphene nanoplatelets; bio-epoxy; interface engineering; life-cycle assessment; Hempoxies.

1 Scope, origins, and scientific attribution

Wang et al. (2013) reported interconnected partially graphitic nanosheets produced from hemp bast fibers and demonstrated electrochemical performance in supercapacitor configurations [1]. Their results establish a plausible nanocarbon feedstock and physical characterization, *not* structural composite performance. In a distinct line of work, Landry publicly proposed comparative testing of hemp-derived carbon nanosheets against graphite-derived graphene in both synthetic and bio-epoxy matrices in a September 2025 Zenodo proposal [2]; subsequent Hempoxies 74 proposals extended this framework to multiscale bio-carbon/vitrimer reinforcements [3]. This manuscript develops and sharpens that

previously articulated Landry hypothesis. It should not be construed as independent discovery of the original nanosheets or independent confirmation of Landry's proposal.

Nomenclature. We use *H-GPCNs* for hemp-derived, graphitic/partially graphitic porous carbon nanosheets when structure is supported by measured diffraction, microscopy, Raman and surface analyses. The labels "hemp graphene" and "graphene-like" are informal analogies; biomass origin and plate-like shape do not establish the strict atomically thin graphene structure. When material provenance or graphitic structure is uncertain, use the more conservative term *hemp-derived carbon nanosheets* (H-CNS). Commercial graphene nanoplatelets (GNPs), graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), and graphite powder must not be treated as interchangeable comparator classes.

2 What is experimentally established?

The 2013 *ACS Nano* report describes nanosheets roughly 10–30 nm thick, with specific surface area as high as 2,287 $m^2\ g^{-1}$, mesopore fraction up to 58%, and reported conductivity of approximately 211–226 $S\ m^{-1}$ in the conditions used by that work [1]. These numbers characterize the reported supercapacitor-oriented material; they are *not* tensile, fracture, shear, or thermal-conductivity results for a polymer composite. They also do not guarantee identical values in independently manufactured batches. Some synthesis embodiments use hydrothermal treatments and chemical activation, which impose energy, chemical, washing, and effluent burdens relevant to an LCA [1, 4].

Research on graphene/epoxy systems provides a relevant but imperfect analogy: filler dispersion, agglomeration, sheet geometry, surface chemistry, and the matrix–filler interface influence composite outcomes [5, 6, 7, 8]. Existing work involving commercial graphene fillers in hemp-fiber/epoxy composites, and separate hemp-derived carbon-fiber/epoxy systems, does *not* directly establish the performance of the specific Mitlin-type porous nanosheet morphology [9, 10]. These results support experimental plausibility rather than direct confirmation.

3 Central, competing, and falsifiable hypotheses

H1 (interface-driven reinforcement): At one or more matched filler mass fractions, independently characterized H-GPCNs will achieve non-inferior fracture toughness relative to an application-relevant commercial GNP grade in the same epoxy matrix; superior outcomes are plausible when resin infiltration, accessible surface groups, and controlled dispersion produce better effective traction transfer.

H2 (multifunctionality): At one or more formulation points, H-GPCNs will provide a useful combination of fracture toughness and electrical properties at an acceptable viscosity and void fraction, compared with GNP and neat-matrix controls. The best candidate need not maximize each single property.

H3 (performance-adjusted sustainability): In a specified production context and impact category, an H-GPCN composite can achieve a lower cradle-to-gate environmental impact per unit of equivalent delivered function than a GNP-based alternative. This is a *conditional*, not universal, prediction.

Null and counter-hypotheses: No meaningful mechanical advantage exists after processing is matched; the high-porosity H-GPCNs consume excess resin or entrap voids; greater defect density degrades load-bearing efficiency; KOH/thermal/chemical activation overwhelms agricultural feedstock benefits; or commercial GNPs outperform H-GPCNs at equivalent functional requirements. The project is scientifically useful even if these null scenarios prevail.

4 Mechanistic rationale and potential failure modes

4.1 Interfacial adhesion and crack-path modification

A rigid nano-reinforcement can influence a crosslinked epoxy via crack deflection, crack pinning, debonding, plastic deformation in surrounding polymer, and altered local stress distribution; which mechanism dominates must be demonstrated experimentally rather than presumed. Wrinkles, pore accessibility, and polar surface groups *might* increase mechanical interlocking or chemical interaction with a resin, but the same morphology may create stress concentrations or inaccessible porosity. A robust claim of interfacial reinforcement requires fracture surfaces plus quantitative mechanical characterization, not microscopy images alone [5, 7].

4.2 Structure–property trade-offs

Graphitic order may promote electronic transport, whereas structural defects and oxygen groups can change wettability and hinder conductive pathways. Very high surface area can increase viscosity, especially if filler–filler networks form before the resin wets all surfaces. Activation may create microporosity beneficial for electrochemical surface area but not for composite load transfer. Hence, there is no monotonic mapping from the 2013 supercapacitor characteristics to improved epoxy fracture strength.

4.3 Sustainability is a process claim, not a botanical label

The environmental footprint of a finished nanocarbon depends on actual crop inputs, co-product allocation, mass yield, drying and carbonization energy, activating-agent manufacture, solvent and water recovery, purification losses, occupational controls, transport, composite curing, service life, and end of life. Comparisons must avoid an unfair baseline such as premium CVD monolayer graphene when an inexpensive commercial GNP grade would serve the application. LCA framing should follow ISO 14040 and ISO 14044 [13, 14]. Evidence from hemp-fiber LCA is useful context but cannot be directly transferred to activated H-GPCNs [11, 12].

5 Proposed material procurement, synthesis, and characterization

A first research stage should purchase one well-documented commercial GNP reference grade and commission or synthesize one H-GPCN batch using a recorded hemp-bast route. Avoid claiming equivalence to Wang et al. without verifying process and microstructure. To avoid favoring a specific supplier, include a second commercial GNP grade or a second H-GPCN batch in an expanded study. A synthesis log must record feedstock source, moisture, preprocessing, all process time–temperature histories, atmosphere, chemicals, mass balances, wastewater management, and batch-to-batch yield.

6 Experimental plan: matched matrix–filler comparisons

6.1 Phase I: screening

Start with a single, commercially specified epoxy–hardener system and validated manufacturer curing conditions. Use the same matrix, mixing energy, degassing, mold geometry, post-cure, test conditioning,

Table 1 – Pre-composite characterization and the hypothesis each observation can test.

Measurement	Decision-relevant interpretation
SEM/TEM/AFM	Lateral size and thickness distributions; agglomerates; distinguish sheet-like structures from irregular char.
Raman + XRD	Disorder and graphitic/turbostratic structural signatures; cannot alone prove monolayer graphene.
XPS/FTIR	Surface elemental states and functional groups; test whether chemistry differs systematically.
BET/porosimetry	Accessible surface and pore-size distribution; compare with resin uptake and rheology.
Four-point probe/pellet conductivity	Intrinsic powder-network transport under controlled consolidation; do not equate with composite conductivity.
TGA/ash/ICP when needed	Thermal behavior, ash/mineral residues, and activator/metal contamination.
Particle size + dispersion microscopy	Quantify agglomerate distribution after mixing, including repeatability.

and nominal filler mass fraction for both fillers. The initial concentrations below are *design choices*, not literature-validated optima.

Table 2 – Illustrative screening groups (all fractions relative to total formulation mass).

Group	Filler	Loading (wt%)
E0	No filler (neat epoxy)	0.0
G05, G10, G20	Commercial GNP	0.5, 1.0, 2.0
H05, H10, H20	Hemp-derived H-GPCN	0.5, 1.0, 2.0

Use at least three independently prepared mixing batches per group, with appropriately powered mechanical specimens nested within batch. The unit of replication for production-process claims is the *independent batch*, not multiple coupons cut from a single plate. A blinded specimen code, randomized test order, and preregistered exclusions reduce confirmation bias. Exact sample size should follow power analysis from pilot variance and a scientifically meaningful minimum effect.

The primary screening endpoint should be fracture resistance (e.g., K_{IC} or G_{IC} under a validated method applicable to the resin and geometry). Secondary endpoints may include tensile modulus/strength, flexural properties, thermal transitions, electrical conductivity, rheology, cure degree, porosity and fracture-surface morphology. Candidate methods include ASTM D5045 for appropriate plastic fracture specimens, ASTM D638 where the specimen geometry is applicable, ASTM D790 for flexure, ASTM D257 for appropriate electrical-resistivity ranges, and DSC/DMA procedures with recorded standards and conditioning. Verify each standard's current edition and applicability before use.

6.2 Phase II: bio-epoxy and vitrimer extension

Only after establishing a reproducible baseline should the program compare a characterized bio-based epoxy, and then a defined hemp-oil-derived vitrimer candidate under the Hempoxies platform [3]. Curing chemistry and crosslink density can confound filler performance; consequently, do not compare different filler types in simultaneously different matrices as proof of filler superiority. Record bio-based content using verifiable feedstock accounting; a plant-oil-derived formulation is not inherently entirely hemp-derived or recyclable.

6.3 Phase III: morphology and interface optimization

If baseline H-GPCNs fail, test whether the outcome results from poor dispersion, residual activation chemistry, sheet-size distribution or interfacial incompatibility. A small pre-registered factorial study could vary surface treatment, dispersion protocol and concentration, with identical treatment controls for GNP. Do not automatically attribute improvements to filler origin when the improved group also receives a stronger surface-functionalization process.

7 Analysis plan, endpoints, and interpretation

Define for each outcome Y a within-matrix enhancement ratio $R_Y = Y_{\text{composite}}/Y_{\text{neat}}$. For direct material comparison at fixed loading w, calculate

$$\Delta_Y(w) = Y_{\text{H-GPCN}}(w) - Y_{\text{GNP}}(w), \qquad \rho_Y(w) = \frac{Y_{\text{H-GPCN}}(w)}{Y_{\text{GNP}}(w)}. \tag{1}$$

These ratios are not universally interpretable: for viscosity, cost and environmental impact, smaller values may be preferable; fracture metrics should be reported alongside uncertainty. Use confidence intervals and mixed-effects models with batch as a random effect where justified. Report raw values, technical replicates, batch-level means, observed failures, and all pre-specified comparisons. Multiplicity corrections should accompany exploratory testing across many properties and concentrations.

Primary decision gate: First establish a reproducible filler–matrix composite; then test a predeclared non-inferiority margin for G_{IC} versus GNP at matched loading, followed by superiority testing only if warranted. **Secondary gate:** assess electrically useful conductivity at tolerable mixing viscosity and mechanical retention. **Environmental gate:** compare only formulations satisfying the same functional acceptance criteria. Absence of a significant difference is not proof of equivalence; a suitably powered non-inferiority/equivalence design is required.

8 Life-cycle assessment and performance-based function

8.1 Goal, system boundary, and comparators

Conduct both (i) a transparent cradle-to-gate nanofiller comparison at the factory gate and (ii) a functional-unit composite comparison including manufacture, replacement rate when supported, and appropriate end-of-life scenarios. A fair reference is a documented commercially available GNP made using a plausible scalable production pathway, not an idealized monolayer graphene benchmark [13, 14]. Use primary foreground data for hemp biomass, activation chemical use, thermal energy, water, wastewater, yield, and any recovery rates; mark database-derived assumptions and perform uncertainty analysis.

Possible functional units include (a) *one epoxy panel meeting a fixed geometry, G_{IC} threshold, modulus threshold and service-life requirement* or (b) *one kilogram of a processable composite satisfying predefined performance criteria.* A mass-only comparison of fillers is a supplemental inventory, not the sole sustainability conclusion.

8.2 Quantification and sensitivity

For impact category k, define a simple screening indicator

$$I_k^{\mathrm{FU}} = \sum_{j=1}^{n} m_j e_{jk} + E\, e_{E,k} + W\, e_{W,k} + I_{\mathrm{waste},k} - C_{\mathrm{justified},k}, \tag{2}$$

where m_j is input mass, e_{jk} the relevant inventory impact factor, E and W energy and water inputs, and credits C are used only when justified by transparent multifunctionality or recycling rules. The formula is a schematic bookkeeping relation, not an ISO-compliant LCIA implementation. Perform sensitivity scenarios for carbonization energy source, KOH recovery, process yield, allocation, transportation and lifetime. Report greenhouse-gas potential alongside water use, eutrophication, acidification, particulate impacts and other material categories where method/data quality allow.

Avoid an unsupported "carbon-negative" finding. Temporary storage of biogenic carbon, counterfactual land use, process emissions, and end-of-life release require separate accounting. Neither hemp cultivation nor carbon-rich nanosheets alone demonstrates net-negative climate impact.

9 Risk, limitations, and research ethics

The principal limitations are: (1) no experimentally validated H-GPCN polymer-composite data are presented here; (2) porous nanosheets cannot be assumed equivalent to GNPs; (3) applications in metals, ceramics, electronics and all future materials exceed the scope of this epoxy-focused protocol; (4) a single successful comparator cannot prove global sustainability optimality; (5) laboratory-scale activation yields and cost cannot be extrapolated directly to industrial throughput. Nanopowder exposure controls, dust control, chemical handling, high-temperature equipment safety, and waste management require site-specific SOPs and qualified laboratory oversight. This manuscript provides research design, not permission or an operational production SOP.

10 Proposed evidence classification and milestones

1. **Demonstrated precedent:** hemp-bast-derived partially graphitic porous nanosheets with electrochemical characterization [1].
2. **Published hypothesis:** Landry's 2025 comparison and 2026 Hempoxies proposal [2, 3].
3. **Analog evidence:** graphene/epoxy interface and dispersion research, plus hemp-related composite and LCA literature [5, 6, 9, 11].
4. **Open evidence gap:** matched H-GPCN-versus-GNP epoxy mechanics, reproducibility, manufacturing inventory, and performance-adjusted LCA.
5. **Decision milestone:** publicly release reproducible datasets, batch process accounting, and both positive and negative comparisons before promotional claims of superiority.

11 Conclusions

The Landry hypothesis is a credible, falsifiable proposition linking a demonstrated hemp-bast nanocarbon morphology to a broader structural-composite application. Wang and Mitlin's 2013 work establishes

the material foundation; Landry's publicly archived 2025–2026 proposals establish prior articulation of the proposed graphene-versus-hemp-nanosheet composite comparison. Evidence from conventional graphene/epoxy systems supports mechanistic plausibility but cannot substitute for matched H-GPCN mechanical data. A superiority claim must survive controlled comparison, independent synthesis verification, and a performance-normalized LCA. Until then, describing H-GPCNs as the *most sustainable* graphene-like nanofiller, or as universally optimal for future materials, would exceed the evidence. The strongest scientific next step is direct, preregistered testing within a narrowly defined epoxy composite system.

Research status and declarations

Article type: hypothesis, synthesis and proposed protocol. **Original experiments:** none reported. **New numerical results:** none. **Competing interests:** the author leads Hempoxies/Landry Industries and has a direct interest in the proposed platform; any subsequent performance assessment should provide independent measurement and external review. **AI assistance:** this manuscript was drafted with AI assistance and is intended for the named author's editorial, methodological, and bibliographic review before submission. **Funding:** not specified; no external funding asserted. **Data availability:** no new datasets generated. **Attribution:** material synthesis precedent credited to Wang, Mitlin and co-authors; composite hypothesis credited to Landry's prior archived works.

Nanosheets de carbone poreux graphitique issus du chanvre comme renforts multifonctionnels potentiellement durables dans les composites polymères

Hypothèse fondée sur la littérature, attribution scientifique et programme de recherche réfutable

Marie-Soleil Seshat Landry
Chercheuse indépendante ; division Hempoxies, Landry Industries
Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada
ORCID : 0009-0008-5027-3337
22 novembre 2026

Résumé

Des nanosheets interconnectés de carbone poreux partiellement graphitique, produits à partir de fibres libériennes de chanvre (H-GPCN), ont été décrits en 2013 par Wang, Mitlin et leurs collaborateurs comme matériaux d'électrode à grande surface spécifique et conducteurs pour supercondensateurs. Cette étude n'a pas démontré expérimentalement leur capacité de renforcement de composites polymères massifs. S'appuyant sur ce précédent de synthèse et sur les propositions de recherche publiées par Landry en 2025–2026, le présent article avance l'hypothèse que des H-GPCN dont la chimie et la morphologie sont maîtrisées pourraient procurer, dans certaines matrices époxy et bioépoxy, un équilibre favorable entre résistance à la rupture, renforcement mécanique, fonctionnalité électrique, aptitude à la mise en œuvre et performance environnementale. Le raisonnement porte sur les compromis entre surface accessible, adhérence interfaciale, dispersion, défauts structuraux, porosité et coûts environnementaux de l'activation. L'origine végétale ne prouve ni la nature strictement graphénique du produit, ni sa supériorité sur le graphène issu du graphite, ni un avantage environnemental. Nous proposons donc une caractérisation indépendante, un protocole comparatif à matrice et teneur contrôlées, des critères d'échec quantitatifs et une analyse du cycle de vie (ACV) fondée sur des unités fonctionnelles de performance équivalente. Aucun résultat expérimental nouveau ni inventaire environnemental validé n'est présenté ; aucune supériorité universelle n'est revendiquée.

Mots-clés : carbone poreux graphitique issu du chanvre ; nanosheets de carbone ; nanocomposites polymères ; nanoplaquettes de graphène ; bioépoxy ; interfaces ; analyse du cycle de vie ; Hempoxies.

12 Portée, origines et attribution scientifique

Wang et coll. (2013) ont obtenu des nanosheets partiellement graphitiques interconnectés à partir de fibres libériennes de chanvre et ont étudié leurs propriétés électrochimiques dans des supercondensateurs [1]. Cette étude établit l'existence d'une architecture nanocarbonée pertinente, mais non ses performances comme renfort structural. Landry a ensuite proposé publiquement, en septembre 2025, une comparaison de nanosheets carbonés issus du chanvre avec du graphène issu du graphite dans des matrices époxy synthétiques et biosourcées [2] ; des propositions Hempoxies 74 de 2026 ont élargi cette approche aux renforts multiscalaires et aux vitrimeres [3]. Le présent manuscrit développe cette hypothèse déjà formulée par Landry ; il ne constitue ni une redécouverte des nanosheets initiaux ni une validation indépendante de cette hypothèse.

Terminologie. L'abréviation H-GPCN désigne ici des nanosheets de carbone poreux graphitique ou partiellement graphitique issus du chanvre, lorsque leur structure est étayée par des analyses de diffraction, microscopie, Raman et de surface. « Graphène de chanvre » et « semblable au graphène » sont des analogies informelles : une origine végétale et une forme feuilletée ne démontrent pas une structure de graphène atomiquement mince. En l'absence de confirmation structurale, « nanosheets

de carbone issus du chanvre » (H-CNS) est préférable. Les nanoplaquettes commerciales de graphène (GNP), l'oxyde de graphène (GO), l'oxyde de graphène réduit (rGO) et la poudre de graphite ne sont pas des comparateurs interchangeables.

13 État des preuves expérimentales

L'article de 2013 dans *ACS Nano* décrit des feuillets d'environ 10–30 nm d'épaisseur, une surface spécifique atteignant 2 287 $m^2\ g^{-1}$, une fraction mésoporeuse allant jusqu'à 58 % et une conductivité rapportée d'environ 211–226 S m^{-1} dans les conditions de cette étude [1]. Ces valeurs caractérisent un matériau destiné aux supercondensateurs ; elles ne représentent pas des mesures de résistance en traction, de ténacité ou de conductivité thermique d'un composite polymère. Elles ne garantissent pas non plus la reproductibilité entre lots. Certains procédés de synthèse utilisent un traitement hydrothermal et une activation chimique ; les besoins en énergie, en réactifs, en lavage et en traitement des effluents doivent entrer dans l'ACV [1, 4].

La littérature sur les composites graphène/époxy fournit des analogies utiles mais imparfaites : la dispersion, l'agglomération, la géométrie des feuillets, la chimie de surface et l'interface matrice–charge influencent les propriétés finales [5, 6, 7, 8]. Des résultats portant sur des fibres de chanvre renforcées par du graphène commercial ou sur des fibres de carbone issues du chanvre ne démontrent pas directement les performances des nanosheets poreux de type Mitlin [9, 10].

14 Hypothèses centrales et hypothèses concurrentes

H1 – Renforcement interfacial : à au moins une fraction massique égale, des H-GPCN caractérisés indépendamment atteindront une ténacité à la rupture non inférieure à celle d'un grade pertinent de GNP commercial, dans la même matrice époxy. Une supériorité est envisageable si l'infiltration de résine, les groupes de surface accessibles et la dispersion améliorent le transfert effectif des contraintes.

H2 – Multifonctionnalité : à certaines compositions, les H-GPCN offriront une combinaison utile de ténacité et de propriétés électriques, avec une viscosité et une fraction de vides acceptables, comparativement aux témoins GNP et époxy pur. Il n'est pas nécessaire de maximiser chaque propriété isolément.

H3 – Durabilité ajustée à la performance : dans un contexte industriel et une catégorie d'impact précisément définis, un composite H-GPCN pourra présenter un impact environnemental inférieur à celui d'un composite GNP pour une fonction rendue équivalente. Il s'agit d'une prédiction conditionnelle, non universelle.

Hypothèses nulles ou concurrentes : aucun avantage mécanique après harmonisation des procédés ; absorption excessive de résine ou piégeage de vides par la porosité ; réduction de l'efficacité structurale par les défauts ; impacts de l'activation au KOH et des traitements thermiques supérieurs aux bénéfices agricoles ; ou supériorité des GNP commerciaux à exigences fonctionnelles égales. Ces résultats négatifs seraient scientifiquement informatifs.

15 Mécanismes envisagés et modes de défaillance

15.1 Adhérence interfaciale et propagation des fissures

Un nanorenfort rigide peut modifier le trajet des fissures, favoriser leur déviation ou leur ancrage, provoquer un décollement interfacial ou modifier la déformation plastique locale d'une époxy réticulée. Les mécanismes dominants doivent être établis par l'expérience. Les ondulations, les pores accessibles et les groupes polaires pourraient améliorer l'ancrage mécanique ou les interactions chimiques ; ils pourraient aussi créer des concentrations de contraintes et des pores inaccessibles. Des images microscopiques seules ne suffisent pas : il faut des mesures mécaniques quantitatives et l'analyse des surfaces de rupture [5, 7].

15.2 Compromis entre structure et propriétés

L'ordre graphitique peut favoriser le transport électronique ; les défauts et les groupes oxygénés modifient la mouillabilité et peuvent interrompre les chemins conducteurs. Une surface spécifique élevée peut augmenter la viscosité et provoquer des réseaux charge–charge avant le mouillage complet par la résine. Une microporosité utile pour le stockage électrochimique ne garantit pas un bon transfert des contraintes. Les propriétés des supercondensateurs de 2013 ne permettent donc pas de prédire directement une meilleure ténacité époxy.

15.3 La durabilité dépend du procédé, pas seulement de la plante

L'empreinte du nanocarbone final dépend des intrants agricoles, de l'allocation entre coproduits, du rendement massique, du séchage, de la carbonisation, de la fabrication et récupération des agents d'activation, des solvants, de l'eau, des pertes de purification, du transport, de la cuisson du composite, de sa durée de vie et de sa fin de vie. Le comparateur doit être un GNP commercial réaliste, et non nécessairement un graphène monocouche produit par dépôt chimique en phase vapeur. L'ACV devrait suivre les principes ISO 14040 et ISO 14044 [13, 14]. Une ACV de fibres de chanvre ne peut être transposée directement à des nanosheets activés [11, 12].

16 Approvisionnement, synthèse et caractérisation proposés

La première étape devrait comparer des GNP commerciaux documentés et des H-GPCN provenant d'une synthèse reproductible, avec traçabilité des lots, du rendement, des intrants et des paramètres thermiques. La chimie exacte, les dangers de procédé et les contrôles nécessaires doivent être déterminés par un laboratoire qualifié. Les observations suivantes permettront de distinguer les effets de l'origine végétale de ceux de la morphologie et de la fabrication.

17 Plan expérimental : comparaisons à matrice contrôlée

17.1 Phase I : dépistage

Utiliser un système époxy–durcisseur commercial spécifié et un cycle de polymérisation validé. Maintenir constants la matrice, l'énergie de mélange, le dégazage, la géométrie des moules, la postcuisson, le conditionnement et la fraction massique nominale de charge. Les concentrations ci-dessous sont des choix de conception, et non des optima démontrés.

Table 3 – Caractérisation préalable et interprétation attendue.

Mesure	Interprétation pertinente
MEB/MET/AFM	Taille latérale, épaisseur, agglomérats ; distinction entre feuillets et charbon irrégulier.
Raman et DRX	Désordre et ordre graphitique ou turbostratique ; ne prouvent pas à eux seuls un graphène monocouche.
XPS/FTIR	États chimiques et groupes fonctionnels de surface.
BET et porosimétrie	Surface accessible et distribution des pores ; relation avec l'absorption de résine et la rhéologie.
Conductivité à quatre pointes	Transport du réseau de poudre consolidée ; ne vaut pas conductivité du composite.
ATG, cendres, ICP	Stabilité thermique, résidus minéraux et contaminants éventuels.
Analyse de dispersion	Distribution des agglomérats après mélange et reproductibilité.

Table 4 – Groupes de dépistage proposés ; pourcentages de la formulation totale.

Groupe	Charge	Teneur (% massique)
E0	Époxy sans charge	0,0
G05, G10, G20	GNP commerciaux	0,5 ; 1,0 ; 2,0
H05, H10, H20	H-GPCN issus du chanvre	0,5 ; 1,0 ; 2,0

Préparer au moins trois lots de mélange indépendants par groupe, puis plusieurs éprouvettes appropriées par lot. L'unité de réplication pour les conclusions de procédé est le lot indépendant, non chaque éprouvette découpée dans une même plaque. Utiliser un codage aveugle, un ordre d'essai aléatoire et des critères d'exclusion préenregistrés. Déterminer l'effectif final par une analyse de puissance fondée sur la variance pilote et l'effet minimal pertinent.

Le critère principal est la résistance à la rupture (par exemple K_{IC} ou G_{IC} selon une méthode validée pour le matériau et la géométrie). Les critères secondaires comprennent le module et la résistance en traction, la flexion, les transitions thermiques, la conductivité électrique, la rhéologie, le degré de polymérisation, les vides et la morphologie des fractures. Vérifier l'édition et l'applicabilité des normes ASTM D5045, D638, D790 et D257 ainsi que des méthodes DSC/DMA avant les essais.

17.2 Phase II : bioépoxy et vitrimères

Après obtention d'une référence reproductible, comparer une bioépoxy caractérisée, puis un candidat vitrimer dérivé d'huile de chanvre dans le cadre Hempoxies [3]. La chimie de polymérisation et la densité de réticulation peuvent masquer l'effet des charges : comparer des charges différentes dans des matrices simultanément différentes ne démontre pas la supériorité d'une charge. La teneur biosourcée doit être justifiée par des données vérifiables.

17.3 Phase III : optimisation de la morphologie et des interfaces

En cas d'échec initial des H-GPCN, étudier la dispersion, les résidus d'activation, la taille des feuillets et la compatibilité interfaciale. Un petit plan factoriel préenregistré peut varier le traitement de surface, le protocole de dispersion et la concentration, avec des témoins GNP soumis aux mêmes traitements. Ne pas attribuer à l'origine végétale une amélioration due à un traitement différent.

18 Analyse des résultats et règles de décision

Pour chaque résultat Y, définir le rapport d'amélioration $R_Y = Y_{\text{composite}}/Y_{\text{matrice pure}}$. À teneur massique w égale, comparer :

$$\Delta_Y(w) = Y_{\text{H-GPCN}}(w) - Y_{\text{GNP}}(w), \qquad \rho_Y(w) = \frac{Y_{\text{H-GPCN}}(w)}{Y_{\text{GNP}}(w)}. \tag{3}$$

L'interprétation dépend du critère : une viscosité, un coût ou un impact plus faibles peuvent être préférables. Présenter intervalles de confiance, valeurs brutes, moyennes par lot et échecs ; utiliser des modèles à effets mixtes si justifiés, et contrôler la multiplicité des comparaisons exploratoires.

Premier seuil de décision : démontrer la reproductibilité, puis tester une marge de non-infériorité de G_{IC} définie à l'avance face aux GNP à charge égale ; ne tester la supériorité que si les résultats le permettent. **Deuxième seuil :** évaluer une conductivité utile sans viscosité excessive ni perte mécanique inacceptable. **Seuil environnemental :** ne comparer que des formulations satisfaisant les mêmes exigences fonctionnelles. Une différence non significative ne prouve pas l'équivalence.

19 Analyse du cycle de vie à fonction équivalente

19.1 Objectif, frontières et comparateurs

Réaliser d'abord une comparaison des nanorenforts du berceau à la sortie d'usine, puis une ACV des composites selon une unité fonctionnelle tenant compte de la fabrication, des remplacements et de la fin de vie lorsque les données le permettent [13, 14]. Employer des données primaires pour les rendements, l'énergie, le KOH, l'eau, les effluents et les taux de récupération ; signaler les hypothèses provenant des bases de données.

Une unité fonctionnelle pourrait être « un panneau époxy de géométrie fixée atteignant les seuils prescrits de G_{IC}, de module et de durée de service », ou « un kilogramme de composite transformable satisfaisant des critères de performance définis ». Une comparaison fondée seulement sur la masse de charge ne suffit pas à établir la durabilité.

19.2 Quantification et sensibilité

Pour la catégorie d'impact k, un indicateur de dépistage peut s'écrire :

$$I_k^{\text{UF}} = \sum_{j=1}^{n} m_j e_{jk} + E e_{E,k} + W e_{W,k} + I_{\text{déchets},k} - C_{\text{justifiés},k}. \tag{4}$$

m_j représente la masse de l'intrant, e_{jk} son facteur d'impact, E l'énergie et W l'eau ; les crédits ne sont appliqués que lorsqu'ils sont justifiés. Cette équation est un schéma comptable, non une méthode d'évaluation d'impact complète conforme aux normes ISO. Faire varier la source d'énergie, la récupération du KOH, les rendements, l'allocation, les transports et la durée de vie. Examiner notamment le potentiel de réchauffement climatique, l'eau, l'eutrophisation, l'acidification et les particules lorsque les données le permettent.

Ne pas déclarer sans preuve un bilan « carbone négatif ». Le stockage temporaire de carbone biogénique, les usages des sols, les émissions du procédé et la libération en fin de vie doivent être comptabilisés séparément. Ni la culture du chanvre ni la richesse en carbone des nanosheets ne prouvent un bilan climatique net négatif.

20 Risques, limites et éthique de recherche

Les principales limites sont : (1) absence de résultats mécaniques nouveaux pour les composites H-GPCN ; (2) non-équivalence présumée des nanosheets poreux et des GNP ; (3) impossibilité d'étendre ce protocole époxy à tous les métaux, céramiques et matériaux futurs ; (4) impossibilité de démontrer une durabilité optimale universelle avec un seul comparateur ; (5) impossibilité d'extrapoler directement les rendements et coûts du laboratoire à l'industrie. Les nanopoudres, poussières, réactifs, températures élevées et déchets nécessitent des procédures de sécurité propres au site et la supervision d'un laboratoire compétent. Ce texte est un plan de recherche, non une procédure autorisant la fabrication.

21 Classification des preuves et jalons

1. **Précédent démontré :** nanosheets poreux partiellement graphitiques issus du chanvre, caractérisés électrochimiquement [1].
2. **Hypothèse publiée :** comparaison proposée par Landry en 2025 et programme Hempoxies de 2026 [2, 3].
3. **Preuves analogiques :** littérature sur les interfaces graphène/époxy, la dispersion, les composites de chanvre et leur ACV [5, 6, 9, 11].
4. **Lacunes :** essais mécaniques directs H-GPCN/GNP à conditions égales, reproductibilité, inventaire industriel et ACV ajustée à la performance.
5. **Jalon décisif :** publier les données reproductibles, les bilans de procédé et les résultats positifs et négatifs avant toute revendication promotionnelle de supériorité.

22 Conclusion

L'hypothèse de Landry est une proposition crédible et réfutable qui relie une architecture nanocarbonée issue du chanvre déjà démontrée à des applications structurales plus larges. Wang, Mitlin et leurs collaborateurs ont établi la base matérielle en 2013 ; les travaux archivés de Landry en 2025–2026 attestent la formulation antérieure de la comparaison entre nanosheets de chanvre et graphène dans les composites. La littérature graphène/époxy appuie la plausibilité des mécanismes, mais ne remplace pas des mesures mécaniques directes et comparables. Toute revendication de supériorité doit résister à des essais contrôlés, à une vérification indépendante de la synthèse et à une ACV normalisée par la fonction rendue. Jusqu'alors, présenter les H-GPCN comme le renfort semblable au graphène *le plus durable*, ou comme la solution optimale pour tous les matériaux futurs, dépasserait les preuves disponibles. La prochaine étape la plus solide consiste en des essais directs préenregistrés dans un système époxy précisément défini.

Statut de recherche et déclarations

Type d'article : hypothèse, synthèse et protocole proposé. **Expériences originales :** aucune. **Résultats numériques nouveaux :** aucun. **Conflits d'intérêts :** l'autrice dirige Hempoxies/Landry Industries et possède un intérêt direct dans la plateforme ; une évaluation ultérieure devrait inclure des mesures indépendantes et un examen externe. **Assistance par IA :** manuscrit rédigé avec une assistance d'IA, à soumettre à la révision éditoriale, méthodologique et bibliographique de l'autrice avant

diffusion scientifique. **Financement :** non précisé ; aucun financement externe revendiqué. **Données :** aucun jeu de données nouveau. **Attribution :** la synthèse initiale est attribuée à Wang, Mitlin et leurs coauteurs ; l'hypothèse comparative à Landry et à ses travaux archivés.

Références bibliographiques / References

Les références ci-dessous sont communes aux deux versions linguistiques ; leurs titres originaux sont conservés.

Références

[1] H. Wang, Z. Xu, A. Kohandehghan, Z. Li, K. Cui, X. Tan, T. J. Stephenson, C. K. King'ondu, C. M. B. Holt, B. C. Olsen, J. K. Tak, D. Harfield, A. O. Anyia, and D. Mitlin, "Interconnected carbon nanosheets derived from hemp for ultrafast supercapacitors with high energy," *ACS Nano* **7**, 5131–5141 (2013). doi:10.1021/nn400731g.

[2] M. S. Landry, "A Comparative Analysis of Hemp-Derived Carbon Nanosheets and Graphite-Derived Graphene as Reinforcing Agents in Synthetic and Bio-Epoxy Composites," *Zenodo*, proposal, published 25 September 2025. doi:10.5281/zenodo.17201998 (version-specific record ; parent concept DOI may differ).

[3] M.-S. S. Landry, "Proposal : Hempoxies 74 Platform : Multiscale Bio-Carbon Reinforcement in Structural Vitrimer Composites," *Zenodo*, 12 July 2026. doi:10.5281/zenodo.21325001. Figures/cost projections in the proposal are not established composite results.

[4] D. Mitlin, H. Wang, Z. Xu, Z. Li, and C. Holt, "Carbon nanosheets," US Patent US10170251B2 (2018).

[5] Authors as listed in publisher record, "Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Graphene–Epoxy Nanocomposites—A Review," *Polymers* **8**, 281 (2016). doi:10.3390/polym8080281. [Author details should be checked against journal metadata before submission.]

[6] "Epoxy/graphene nanocomposites – processing and properties : a review," *RSC Advances* **5**, 73510–73524 (2015). doi:10.1039/C5RA13897C.

[7] "Interfacial structures and mechanisms for strengthening and enhanced conductivity of graphene/epoxy nanocomposites," *Polymer* (2018). doi:10.1016/j.polymer.2018.12.055.

[8] "Exfoliation and dispersion of graphene nanoplatelets for epoxy nanocomposites," *Advanced Nanocomposites* (2023). doi:10.1016/j.adna.2023.10.001.

[9] "Investigation of Mechanical and Impact Properties of Hemp Fiber Reinforced Epoxy-Based Nanocomposites," *Polymer Composites* (2025). doi:10.1002/pc.30135. [Commercial graphene filler in hemp-fiber composites ; not a test of Mitlin-type H-GPCNs.]

[10] "Mechanical, electrical, thermal and tribological behavior of epoxy resin composites reinforced with waste hemp-derived carbon fibers," *Journal of Materials Science* (2022). doi:10.1007/s10853-022-07550-9.

[11] "Environmental assessment of woven hemp fibre reinforced epoxy composites and potential applications in aerospace and electric scooter industries," *Sustainable Materials and Technologies* (2023). Publisher page.

[12] "Hemp fiber and its bio-composites : a short review part II—applications and life cycle assessment," *Discover Materials* (2025). doi:10.1007/s42114-025-01414-x.

[13] International Organization for Standardization, *ISO 14040 :2006 : Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*. ISO catalog.

[14] International Organization for Standardization, *ISO 14044 :2006 : Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines*. ISO catalog.