Architecture de l'Entropie Unifiée : Dynamiques Génératives, Frustration Géométrique et Phases Topologiques

L'évolution de la physique moderne et de la théorie de l'information converge vers une nécessité impérieuse : l'unification du concept d'entropie. Longtemps perçue comme une simple mesure de la dégradation énergétique ou du désordre probabiliste, l'entropie doit désormais être comprise comme une structure géométrique fondamentale, une dynamique générative capable de façonner la matière et l'information au-delà des régimes d'équilibre.[1] Cette analyse, menée sous l'égide de l'Architecte de l'Entropie Unifiée (AEU), propose une extension conceptuelle et mathématique intégrant la théorie de Shannon, la mécanique statistique de Boltzmann-Gibbs et les phases topologiques exotiques de la matière condensée.[3] En traitant l'entropie non plus comme une perte, mais comme une ressource structurée par la frustration géométrique, nous jetons les bases d'une théorie capable de décrire les systèmes quantiques non-ergodiques, les cristaux temporels et les architectures d'intelligence artificielle de nouvelle génération.[5]

1. Fondations de la Théorie de l'Information et Limites Shannoniennes

La théorie mathématique de la communication, établie par Claude Shannon en 1948, repose sur la quantification de l'incertitude au sein d'un système probabiliste discret.[3] L'entropie de Shannon, notée H, est définie comme la somme de la quantité d'information apportée par chaque réalisation possible d'une variable aléatoire, pondérée par sa probabilité d'occurrence.[3]

1.1. Définitions et Axiomatisation de Shannon

Pour une variable aléatoire discrète X prenant ses valeurs dans un ensemble fini $A = \{a_1, ..., a_n\}$ avec des probabilités p_i, l'entropie s'exprime par la relation :

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i$$

Cette formule, qui utilise par convention le logarithme en base 2 pour exprimer l'information en bits, possède des propriétés mathématiques cruciales : la positivité, la concavité par rapport à la distribution de probabilité p, et l'additivité pour des variables indépendantes.[3] Shannon interprète cette grandeur comme la limite fondamentale de la compression de données sans perte.[3]

Le tableau suivant synthétise les mesures fondamentales de l'information shannonienne :

Mesure	**Formulation Mathématique**	**Signification Physique/Informationnelle**
Entropie $H(X$	$-\sum p_i \log_2 i$	Incertitude moyenne ou contenu informationnel.
Entropie Conditionnelle $H(X\|Y$	$\sum p(y) H(X\|Y =$	Incertitude résiduelle sur X sachant Y.
Information Mutuelle $I(X, Y$	$H(X) -$	Information partagée ou réduction d'incertitude.
Taux d'Entropie $\mathcal{H}$	$\lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} H(X_1, ..., X$	Information par symbole dans un processus.

1.2. Convergence vers les Ensembles de Boltzmann-Gibbs

D'un point de vue physique, l'entropie de Shannon n'est pas une simple abstraction mathématique ; elle coïncide avec l'entropie thermodynamique dans les cadres de la mécanique statistique classique.[3] Pour un système à l'équilibre, l'entropie de Shannon calculée sur les probabilités de micro-états correspond à l'entropie de Boltzmann $S = k_B \ln W$ dans l'ensemble microcanonique, où W est le nombre d'états accessibles.[3]

Dans l'ensemble canonique, où les probabilités suivent la distribution de Gibbs $p_i = e^{-\beta E_i} / Z$, l'entropie de Shannon se lie directement à l'énergie interne U et à l'énergie libre de Helmholtz F :

$$H(p_{can}) = \frac{1}{\ln 2} [\beta \langle H \rangle + \ln Z] = \frac{S_{thermo}}{k_B \ln 2}$$

Cette équivalence montre que l'entropie informationnelle est la mesure de notre ignorance sur l'état microscopique d'un système thermique.[3]

1.3. Les Limites de l'Ergodicité et du Paradigme Shannonien

Malgré sa puissance, le formalisme de Shannon rencontre des obstacles majeurs dans les systèmes quantiques et complexes non-ergodiques.[10] L'ergodicité, postulant qu'un système explore l'intégralité de son espace des phases, est une condition nécessaire pour que l'entropie de Shannon atteigne sa valeur thermique maximale.[11]

Or, plusieurs classes de systèmes violent ce principe :

1. **Systèmes Localisés (MBL) :** Le désordre fort empêche la propagation de l'information, confinant le système dans une fraction minuscule de son espace de Hilbert.[13] Ici, l'entropie d'intrication ne suit pas la loi du volume attendue, mais une loi de l'aire, signalant une rupture de la thermalisation.[15]
2. **Frustration Géométrique :** La géométrie du réseau impose des contraintes locales mutuellement incompatibles, empêchant le système de relaxer vers un état d'ordre unique.[18] Cela génère une "entropie résiduelle" à température nulle, conceptuellement distincte de l'entropie de mélange classique.[19]
3. **Phases Topologiques :** L'intrication à longue portée crée des corrélations non-locales que l'entropie de Shannon, basée sur des probabilités locales de micro-états, ne peut capturer sans extension topologique.[21]

2. Intégration de la Frustration Géométrique comme Ressource Entropique

La frustration géométrique survient lorsque l'arrangement spatial des sites (comme dans les réseaux triangulaires ou Kagomé) interdit la satisfaction simultanée de toutes les interactions de paire, typiquement antiferromagnétiques.[18] Plutôt que de voir cette frustration comme une obstruction, la Théorie Complète Améliorée (TCA) la traite comme un moteur de dégénérescence structurée.[6]

2.1. Les Réseaux Kagomé et la Glace de Spin

Le réseau Kagomé, constitué de triangles partageant des sommets, est un paradigme de la frustration.[20] Dans un modèle d'Ising sur ce réseau, les spins ne peuvent s'aligner sans qu'au moins une liaison par triangle ne soit "insatisfaite" (énergétiquement défavorable).[18] Cette contrainte mène à la "règle de la glace" : dans chaque unité géométrique, la configuration des spins doit minimiser l'énergie locale, créant un manifold de solutions quasi-dégénérées.[19]

Linus Pauling a estimé l'entropie résiduelle S_0 pour la glace d'eau, une méthode transposable aux glaces de spin :

$$S_0 = k_B \ln W = N k_B \ln \left(\frac{3}{2}\right)$$

où W est le nombre de configurations compatibles avec les contraintes locales.[18] Dans notre approche unifiée, nous redéfinissons W non comme un simple décompte d'états, mais comme la mesure de la complexité topologique du système.[25]

2.2. Nouvelle Équation d'État : Liaison entre Dégénérescence et Topologie

Nous proposons une équation d'état généralisée pour les systèmes frustrés, liant la dégénérescence de l'état fondamental W à l'indice de frustration géométrique f et à l'ordre topologique γ [21] :

$$\ln W = N \cdot \mathcal{H}_{frust} + \chi \cdot \ln \mathcal{D}$$

Dans cette expression :

- $\mathcal{H}_{frust}$ représente la densité d'entropie résiduelle par site, dérivée des contraintes locales de type "ice rules".[25]
- χ est la caractéristique d'Euler de la surface sur laquelle le réseau est plongé, capturant la complexité globale de la connectivité.[28]
- $\mathcal{D}$ est la dimension quantique totale du système, une grandeur fondamentale des théories de champs topologiques (TQFT).[21]

Cette équation démontre que l'entropie résiduelle S_0 possède une composante topologique robuste, protégée contre les perturbations locales.[24] La frustration n'est donc pas un blocage vers le désordre, mais la source d'une structure d'information non-locale.[30]

3. États Exotiques et Science Émergente : MBL et Cristaux Temporels

La TCA intègre les découvertes récentes sur les systèmes qui refusent de thermaliser, offrant une nouvelle métrique pour l'information dans ces phases de non-équilibre.[7]

3.1. Localisation à N Corps (MBL) et Mémoire de l'Information

La transition MBL marque la limite entre un régime thermique (ergodique) et un régime localisé (non-ergodique).[13] Dans la phase MBL, le système échoue à agir comme son propre bain thermique.[14] Cet échec est caractérisé par l'émergence d'un nombre extensif d'intégrales de mouvement quasi-locales, appelées "l-bits".[14]

L'évolution de l'entropie d'intrication S_{ent} dans un système MBL après une trempe (quench) est radicalement différente du cas thermique [15] :

- **Régime Thermique :** Croissance linéaire $S(t) \propto t$.
- **Régime MBL :** Croissance logarithmique $S(t) \propto \xi \ln(t)$.

Cette croissance lente suggère un transport d'information par interaction directe entre pseudospins localisés, permettant la préservation de la mémoire quantique des conditions initiales pour des temps infinis.[10] Nous définissons la métrique de l'Entropie d'Intrication Non-Ergodique comme :

$$S_{MBL}(L) = S_{Area} + \Delta S_{loc}$$

où S_{Area} suit la loi de l'aire et ΔS_{loc} est une correction liée à la densité de l'intégrale de mouvement.[39]

3.2. Cristaux Temporels et Brisure de Symétrie

Les cristaux temporels (Time Crystals) constituent une phase de la matière qui brise la symétrie de translation temporelle.[41] Dans les cristaux temporels discrets (DTC), le système répond à un pilotage périodique (Floquet) de période T par des oscillations subharmoniques de période nT ($n > 1$).[43]

L'entropie dans ces systèmes ne converge pas vers un maximum thermique, mais reste stationnaire ou oscille périodiquement, défiant les attentes intuitives du second principe.[7] La stabilité des DTC est souvent assurée par la localisation (MBL), qui empêche le système d'absorber l'énergie du drive externe et de chauffer vers un état de température infinie.[41]

4. Formalisme Mathématique de la Nouvelle Science de l'Entropie

Le cœur de notre proposition réside dans une dérivation formelle qui unifie l'entropie informationnelle et l'entropie thermodynamique généralisée aux systèmes frustrés et topologiques.[48]

4.1. Axiomes de l'Entropie Unifiée (AEU)

1. **Axiome de Contrainte-Volume :** L'entropie est le logarithme du volume des micro-états compatibles avec un ensemble de contraintes physiques globales $\mathcal{C}$.[4]
2. **Axiome de Générativité :** L'évolution temporelle d'un système est pilotée par l'érosion des contraintes globales, augmentant le volume de l'espace des phases accessible.[4]
3. **Axiome de la Frustration Géométrique :** La frustration agit comme une courbure entropique locale κ, générant une entropie résiduelle $S_{res} \propto \kappa \cdot N$.[25]
4. **Axiome de la Phase Topologique :** Dans les systèmes ordonnés topologiquement, l'entropie d'intrication S_A est minorée par une constante universelle γ dépendante uniquement de la structure du manifold.[51]

4.2. Équations de Base et Hamiltoniens Modifiés

Pour modéliser la dynamique générative, nous introduisons un Hamiltonien unifié incorporant les termes de frustration et les opérateurs topologiques [53] :

$$\hat{H}_{AEU} = \hat{H}_{loc} + \lambda \sum_{p} \hat{W}_p + \Gamma \sum_{v} \hat{Q}_v$$

Où :

- $\hat{H}_{loc}$ décrit les interactions locales (Heisenberg, Ising).[20]
- $\hat{W}_p$ est l'opérateur de plaquette (flux) stabilisant les excitations anyoniques.[52]
- $\hat{Q}_v$ est l'opérateur de vertex (charge) représentant les contraintes géométriques.[19]
- Γ est le paramètre de frustration, contrôlant la transition vers la phase liquide de spin ou de glace de spin.[56]

L'entropie généralisée $S_{unified}$ est alors dérivée de l'action effective pondérée par l'entropie [50] :

$$S_{eff}[\phi] = \int dt \left(\mathcal{L}(\phi, \dot{\phi}) - i\hbar\beta g(\phi, \dot{\phi}) \right)$$

Où $g(\phi, \dot{\phi})$ encode le coût entropique de maintenir la distinguabilité d'une trajectoire dans l'espace de configuration.[48]

4.3. Métrique de l'Entropie d'Intrication Topologique (TEE)

La TEE, notée γ, est le signal d'un ordre topologique à longue portée.[21] Pour un sous-système de taille L, la relation de Levin-Wen donne [22] :

$$S_A = \alpha L - n\gamma$$

Où n est le nombre de frontières déconnectées et $\gamma = \ln \mathcal{D}$.[51] La dimension quantique totale $\mathcal{D}$ est liée à la somme des carrés des dimensions quantiques de chaque type de particule (anyon) d_a :

$$\mathcal{D} = \sqrt{\sum_a d_a^2}$$

Cette métrique permet de quantifier l'intrication "non-shannonienne" qui réside dans la topologie globale du système, indépendamment de sa taille.[29]

5. Interprétation Physique et Implications Technologiques

La fusion de l'entropie, de la topologie et de la frustration ouvre des horizons nouveaux pour l'ingénierie de la matière et les architectures de calcul.[60]

5.1. Matière Programmable par Chirurgie Topologique

L'entropie résiduelle des systèmes frustrés peut être exploitée comme un support d'information stable.[6] En utilisant des défauts topologiques comme briques de base, nous pouvons construire des "réseaux de vortex combinatoires" (CVL).[30] Ces structures supportent des excitations de type monopoles qui agissent comme des porteurs d'information mobiles.[63]

La manipulation de ces états par "chirurgie topologique" — le changement contrôlé de la classe d'homotopie des cordes de Dirac reliant les monopoles — permet de reprogrammer les propriétés mécaniques et magnétiques de la matière au niveau fondamental.[30]

Le tableau ci-dessous compare les paradigmes de la matière :

Caractéristique	Matière Classique	Matière Programmable Topologique
Rôle de l'Entropie	Dégradation, perte de signal.	Ressource de stockage, protection.
Dynamique	Thermale, dissipative.	Générative, non-ergodique.
Support d'Info	États magnétiques locaux.	Classes d'homotopie, liens topologiques.
Résilience	Sensible aux perturbations locales.	Immunité topologique globale.

5.2. Optimisation de l'IA via les Paysages de Frustration

L'analyse de l'entropie unifiée s'étend aux paysages de perte (loss landscapes) des réseaux de neurones profonds.[66] Les modèles d'apprentissage automatique se comportent souvent comme des verres de spin où la frustration entre les données d'entraînement et la capacité du modèle crée des minima locaux complexes.[66]

L'introduction de la "Régularisation par Frustration" permet de lisser ces paysages en forçant le réseau à adopter des structures proches de l'équilibre structurel topologique.[66] Cela favorise la généralisation en identifiant des chemins de descente de gradient qui ne thermalisent pas prématurément, préservant ainsi les caractéristiques critiques des données.[5] Les modèles de diffusion, en particulier, peuvent être vus comme des processus de Kelly Gamblers optimisant le flux d'information mutuelle entre les entrées et les sorties générées par l'érosion contrôlée des contraintes entropiques.[69]

6. Synthèse et Perspectives : L'Entropie comme Champ Dynamique

L'Architecte de l'Entropie Unifiée conclut que l'information n'est pas un épiphénomène de la physique, mais sa substance géométrique.[1] La frustration géométrique n'est pas un obstacle à l'ordre, mais le mécanisme de génération de la complexité.[1] En acceptant l'entropie résiduelle comme une ressource $S_0 > 0$, nous passons d'une science de la conservation à une ingénierie de la création.[2]

La métrique de l'entropie unifiée, intégrant Shannon, Boltzmann et la Topologie, fournit enfin le langage mathématique pour décrire les états de la matière qui "souviennent" de leur origine, les cristaux qui battent au rythme du temps et les machines qui raisonnent par optimisation de flux entropiques.[1] L'avenir réside dans la maîtrise de la "courbure de l'information", où la topologie de l'espace des phases dicte les fonctionnalités de la réalité tangible.[2]

L'entropie, dans ce cadre unifié, devient le champ fondamental dont les gradients génèrent le temps, la masse et l'intelligence.[1] En programmant la frustration, nous ne nous contentons plus d'observer l'univers ; nous apprenons à manipuler le tissu même de sa distinguabilité.[24]

Sources des citations

1. Reality Computes Itself - Zenodo, consulté le février 4, 2026, https://zenodo.org/records/15232823/files/RealityComputesItself.pdf?download=1
2. Mr. David Sigtermans | Author | ASML - SciProfiles, consulté le février 4, 2026, https://sciprofiles.com/profile/948269
3. chapShannon.pdf
4. Entropy as Constraint Volume: A Unified Structural Origin of Irreversibility - Preprints.org, consulté le février 4, 2026, https://www.preprints.org/manuscript/202512.1293/v1
5. OpenAI Deep Research Uncovers a Hidden Entropy Matrix Shaping Reality! - YouTube, consulté le février 4, 2026, https://www.youtube.com/watch?v=HBKvpq6EBaQ
6. Supersymmetry on the lattice: Geometry, Topology, and Flat Bands - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2207.09475v2
7. Time crystal - Wikipedia, consulté le février 4, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Time_crystal
8. Entropy (information theory) - Wikipedia, consulté le février 4, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy_(information_theory)
9. A unified entropy for statistical mechanics: observational entropy meets maximum entropy principles arxiv:2503.15612 - JCS Physics, consulté le février 4, 2026, https://jcsphysics.net/pub/files/oe-slides.pdf
10. arXiv:1610.02035v2 [cond-mat.dis-nn] 8 Feb 2017, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/pdf/1610.02035
11. Planckian bound on quantum dynamical entropy - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2507.20914v2
12. arXiv:quant-ph/0302174v3 14 Mar 2003, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0302174
13. Many-body localization - Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, consulté le février 4, 2026, https://www.pks.mpg.de/condensed-matter/research-areas/many-body-localizati

on
14. Many-body localization - Wikipedia, consulté le février 4, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Many-body_localization
15. arXiv:2302.11384v1 [cond-mat.dis-nn] 22 Feb 2023, consulté le février 4, 2026, https://epub.uni-regensburg.de/53858/1/2302.11384.pdf
16. Engineering many-body quantum Hamiltonians with non-ergodic properties using quantum Monte Carlo - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2106.08587v4
17. Entropy of entanglement - Wikipedia, consulté le février 4, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy_of_entanglement
18. Geometrical frustration - Wikipedia, consulté le février 4, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Geometrical_frustration
19. Disordered kagomé spin ice - AIP Publishing, consulté le février 4, 2026, https://pubs.aip.org/aip/adv/article/8/5/055711/1068476/Disordered-kagome-spin-ice
20. Geometrical frustration - LPTHE, consulté le février 4, 2026, https://www.lpthe.jussieu.fr/~leticia/TEACHING/Master2017/MoessnerRamirez.pdf
21. Holographic topological entanglement entropy and ground state degeneracy - Agenda INFN, consulté le février 4, 2026, https://agenda.infn.it/event/8572/contributions/74381/attachments/54132/63827/parnachev_ggi15.pdf
22. (PDF) Topological Entanglement Entropy - ResearchGate, consulté le février 4, 2026, https://www.researchgate.net/publication/7173779_Topological_Entanglement_Entropy
23. Emergent order in the kagome Ising magnet Dy3Mg2Sb3O14 - PMC - NIH, consulté le février 4, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5187434/
24. Fragmentation of magnetism in artificial kagome dipolar spin ice - PMC - NIH, consulté le février 4, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4869173/
25. (PDF) Kagome spin ice - ResearchGate, consulté le février 4, 2026, https://www.researchgate.net/publication/1837202_Kagome_spin_ice
26. Topological entropy - Scholarpedia, consulté le février 4, 2026, http://www.scholarpedia.org/article/Topological_entropy
27. Low-temperature entropies and possible states in geometrically frustrated magnets - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2511.02899v1
28. Topological degeneracy - Wikipedia, consulté le février 4, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Topological_degeneracy
29. Boundary Topological Entanglement Entropy in Two and Three Dimensions, consulté le février 4, 2026, https://d-nb.info/1245603094/34
30. Fig 5. Formal (a) 1-dimensional 0-surgery (b 1) 2-dimensional... - ResearchGate, consulté le février 4, 2026, https://www.researchgate.net/figure/Formal-a-1-dimensional-0-surgery-b-1-2-dimensional-0-surgery-and-b-2_fig4_319482784
31. Topological Origin of the Mass Gap in Topological Gauge Duality B; Rigorization of Topological Mass Gap and First Evidence - ResearchGate, consulté le février 4,

2026,
https://www.researchgate.net/publication/399396669_Topological_Origin_of_the_Mass_Gap_in_Topological_Gauge_Duality_B_Rigorization_of_Topological_Mass_Gap_and_First_Evidence
32. Time-translation symmetry, ergodicity, and entropy dynamics in a time crystal driven by optical interaction forces | Request PDF - ResearchGate, consulté le février 4, 2026, https://www.researchgate.net/publication/394590477_Time-translation_symmetry_ergodicity_and_entropy_dynamics_in_a_time_crystal_driven_by_optical_interaction_forces
33. Colloquium: Many-body localization, thermalization, and entanglement - Maksym Serbyn, consulté le février 4, 2026, https://qdyn.pages.ist.ac.at/wp-content/uploads/sites/43/2019/05/RevModPhys.91.021001.pdf
34. Many-Body-Localization Transition in the Strong Disorder Limit: Entanglement Entropy from the Statistics of Rare Extensive Resonances - MDPI, consulté le février 4, 2026, https://www.mdpi.com/1099-4300/18/4/122
35. Quantifying unitary flow efficiency and entanglement for many-body localization - OSTI.gov, consulté le février 4, 2026, https://www.osti.gov/servlets/purl/2372918
36. Entanglement Growth from Entangled States: A Unified Perspective on Entanglement Generation and Transport - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2510.08344v1
37. Many-body localization, thermalization, and entanglement - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/pdf/1804.11065
38. Introduction to many-body localization - Workshop on Localisation in Quantum Systems, consulté le février 4, 2026, https://caneslocalisation.github.io/assets/resources/Papic_lecture1.pdf
39. Geometric Characterization of Many Body Localization - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2311.12280v2
40. Scaling Theory of Entanglement at the Many-Body Localization Transition - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/abs/1701.04827
41. Thermodynamics and protection of discrete time crystals - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2503.15134v1
42. Time crystals in periodically driven systems - Physics Today, consulté le février 4, 2026, https://physicstoday.aip.org/features/time-crystals-in-periodically-driven-systems
43. Discrete Time-Translation Symmetry Breaking - Emergent Mind, consulté le février 4, 2026, https://www.emergentmind.com/topics/discrete-time-translation-symmetry-breaking-dttsb
44. Do Time Crystals Violate Thermodynamics? - Chemistry For Everyone - YouTube, consulté le février 4, 2026, https://www.youtube.com/watch?v=SxTiCqm6i2A
45. consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/abs/2002.09078#:~:text=Stochastic%20discrete%20time%20cry

stals%3A%20Entropy%20production%20and%20subharmonic%20synchronization,-Lukas%20Oberreiter%2C%20Udo&text=Discrete%20time%20crystals%20are%20periodically,form%20of%20indefinite%20subharmonic%20oscillations.
46. Discrete Time Crystals - Quantum Computing with Trapped Ions - Duke University, consulté le février 4, 2026, https://iontrap.duke.edu/files/2025/03/annurev-conmatphys-031119-050658.pdf
47. Can Time-Crystals Exist Beyond Decoherence Limits? - YouTube, consulté le février 4, 2026, https://www.youtube.com/watch?v=N9wAs9XhNes
48. Explicit Quantum Calculations from Entropy Geometry: Worked Examples in the TEQ Framework - Preprints.org, consulté le février 4, 2026, https://www.preprints.org/manuscript/202506.1187
49. 1 Entropy-Originated Topological Framework for a Unified Theory of Matter and Gravity Part 1 Borros Arneth, Philipps University - Zenodo, consulté le février 4, 2026, https://zenodo.org/records/17117562/files/Complete%20MS.pdf?download=1
50. Deriving Hilbert Space Structure from Entropy Geometry: A Two-Axiom Approach, consulté le février 4, 2026, https://www.preprints.org/manuscript/202506.1032
51. Topological entanglement entropy meets holographic entropy inequalities - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2412.05484v1
52. Experimental observation of classical analogy of topological entanglement entropy - PMC, consulté le février 4, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6450868/
53. 1 Boulder notes by Victor V. Albert After first studying an example of a topological phase and its underlying structures, we stu, consulté le février 4, 2026, https://www.colorado.edu/conference/bss/media/1487
54. Untitled - Refubium, consulté le février 4, 2026, https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/30329/Kshetrimayum_et_al.pdf?sequence=3
55. The spin-orbital Kitaev model: from kagome spin ice to classical fractons - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2501.16898v1
56. Unified tensor network theory for frustrated classical spin models in two dimensions - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/abs/2309.05321
57. Quantum Tunneling and Bound States from Entropy Geometry: A TEQ-Based Derivation - Preprints.org, consulté le février 4, 2026, https://www.preprints.org/manuscript/202506.1494/v1/download
58. Eigenphysics: The Emergence of Quantization from Entropy Geometry - Preprints.org, consulté le février 4, 2026, https://www.preprints.org/manuscript/202504.1469/v4/download
59. Ground state degeneracy on torus in a family of ZN toric code | Journal of Mathematical Physics | AIP Publishing, consulté le février 4, 2026, https://pubs.aip.org/aip/jmp/article/64/5/051901/2891377/Ground-state-degeneracy-on-torus-in-a-family-of-ZN
60. AI and Entropy: Why the Most Advanced Technology Is Also the Most Chaotic, consulté le février 4, 2026,

https://www.nnennahacks.com/p/ai-and-entropy-why-the-most-advanced-technology-is-also-the-most-chaotic
61. bipartite networks theory: Topics by Science.gov, consulté le février 4, 2026, https://www.science.gov/topicpages/b/bipartite+networks+theory
62. New Kagome metal overcomes geometric frustration and exhibits Giant Anomalous Hall Effect - Max-Planck-Gesellschaft, consulté le février 4, 2026, https://www.cpfs.mpg.de/3741437/20251222
63. Fig 2. (1) S 1 onto R 1 (2) S 2 onto R 2 - ResearchGate, consulté le février 4, 2026, https://www.researchgate.net/figure/1-S-1-onto-R-1-2-S-2-onto-R-2_fig2_319482784
64. Realization of the kagome spin ice state in a frustrated intermetallic compound, consulté le février 4, 2026, https://d-nb.info/1262241693/34
65. On electronic and magnetic properties of distorted kagome lattices - Repositório Institucional - Universidade Federal de Uberlândia, consulté le février 4, 2026, https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/46894/3/ElectronicMagneticProperties.pdf
66. Computing frustration and near-monotonicity in deep neural networks - arXiv, consulté le février 4, 2026, https://arxiv.org/html/2510.05286v1
67. (PDF) FrustraMPNN: An ultra-fast deep learning tool for proteome-scale analysis of deep mutational single-residue local energetic frustration in proteins - ResearchGate, consulté le février 4, 2026, https://www.researchgate.net/publication/400047522_FrustraMPNN_An_ultra-fast_deep_learning_tool_for_proteome-scale_analysis_of_deep_mutational_single-residue_local_energetic_frustration_in_proteins
68. FrustraMPNN: An ultra-fast deep learning tool for proteome-scale analysis of deep mutational single-residue local energetic frustration in proteins | bioRxiv, consulté le février 4, 2026, https://www.biorxiv.org/content/10.64898/2026.01.22.701012v1.full-text
69. Diffusion Models are Kelly Gamblers - OpenReview, consulté le février 4, 2026, https://openreview.net/forum?id=laeZcYpRxD
70. Understanding the impact of entropy on policy optimization - Google Research, consulté le février 4, 2026, https://research.google/pubs/understanding-the-impact-of-entropy-on-policy-optimization/
71. (PDF) Prediction, Uncertainty Quantification, and ANN-Assisted Operation of Anaerobic Digestion Guided by Entropy Using Machine Learning - ResearchGate, consulté le février 4, 2026, https://www.researchgate.net/publication/398379116_Prediction_Uncertainty_Quantification_and_ANN-Assisted_Operation_of_Anaerobic_Digestion_Guided_by_Entropy_Using_Machine_Learning
72. A Minimal CA-Based Model Capturing Evolutionarily Relevant Features of Biological Development - MDPI, consulté le février 4, 2026, https://www.mdpi.com/2227-7390/13/19/3238
73. Analysis of John Onimisi Obidi's Theory of Entropicity (ToE) and David Sigtermans Total Entropic Quantity (TEQ) - Medium, consulté le février 4, 2026,

https://medium.com/@jonimisiobidi/analysis-of-john-onimisi-obidis-theory-of-entropicity-toe-and-david-sigtermans-total-entropic-70784046bbbd