

Théorie Unifiée du Soliton : Des Fondements Quantiques aux Architectures de Stockage Biomimétiques et à la Cohérence du Vivant

Le phénomène du soliton, cette onde solitaire capable de maintenir sa structure et sa vitesse au sein de milieux hautement complexes, représente l'un des piliers les plus fascinants de la physique non linéaire moderne. Longtemps considéré comme une curiosité hydrodynamique, le soliton s'est révélé être une entité fondamentale au sein des systèmes biologiques, agissant comme le vecteur de la cohérence à longue distance, du transport d'énergie métabolique et du stockage de l'information génétique. Cette analyse approfondie explore la transition du soliton depuis ses racines mathématiques rigoureuses jusqu'à son rôle central dans la biophysique humaine, pour enfin proposer une synthèse technique complète visant à révolutionner l'ingénierie de l'information par le biomimétisme.

1. Les Fondements Mathématiques et Physiques : La Genèse de l'Onde Particule

La compréhension du soliton nécessite une déconstruction de la dynamique ondulatoire classique. Dans un système linéaire, une onde se disperse inévitablement avec le temps, car ses composantes fréquentielles se déplacent à des vitesses différentes. Le soliton, cependant, émerge d'un équilibre dynamique délicat et persistant entre deux forces antagonistes : la non-linéarité et la dispersion.¹

L'Équilibre Fondamental : Non-linéarité versus Dispersion

Pour qu'un soliton maintienne sa forme, la tendance de l'onde à s'étaler (dispersion) doit être exactement compensée par sa tendance à se concentrer (non-linéarité). Mathématiquement, la dispersion est souvent représentée par des dérivées spatiales d'ordre supérieur, tandis que la non-linéarité est introduite par des termes où l'amplitude de l'onde influence sa propre propagation.¹

La non-linéarité agit comme un mécanisme de raidissement. Dans un canal d'eau, par exemple, les parties les plus hautes de l'onde se déplacent plus rapidement que les parties plus basses, ce qui tend à créer un front d'onde escarpé. Sans opposition, cela mènerait à un déferlement. La dispersion, à l'inverse, agit comme un filtre qui étale les hautes fréquences,

adoucissant les gradients. Le soliton est l'état stationnaire où ces deux effets se neutralisent mutuellement, permettant à une impulsion de voyager indéfiniment sans déformation, même après avoir traversé d'autres impulsions similaires.¹

L'Équation de Korteweg-de Vries (KdV)

L'équation de Korteweg-de Vries est le modèle fondateur des ondes solitaires en milieu peu profond.⁴ Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$u_t + 6uu_x + u_{xxx} = 0$$

Dans cette équation, $u(x, t)$ représente le déplacement de la surface. Le terme $6uu_x$ est le terme d'advection non linéaire, responsable du raidissement de l'onde, tandis que u_{xxx} représente la dispersion du troisième ordre.⁴ La découverte numérique par Zabusky et Kruskal en 1965 a montré que les solutions de cette équation se comportent comme des entités discrètes, conservant leur forme après collision, ce qui a conduit à la forge du terme "soliton" pour souligner leur nature de quasi-particule.²

La solution typique pour un soliton unique est donnée par :

$$u(x, t) = \frac{v}{2} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{\sqrt{v}}{2} (x - vt) \right)$$

Cette expression démontre une propriété fondamentale : la vitesse v du soliton est directement proportionnelle à son amplitude. Plus le soliton est haut, plus il est étroit et plus il se déplace rapidement.¹ Cette relation intrinsèque entre structure et dynamique est le premier indice de la capacité du soliton à encoder de l'information de manière robuste.

L'Équation de Schrödinger Non Linéaire (NLSE)

Alors que la KdV décrit des ondes de surface, l'équation de Schrödinger non linéaire (NLSE) régit l'évolution des enveloppes d'ondes dans des systèmes dispersifs, tels que les fibres optiques ou les chaînes moléculaires biologiques.⁷ Elle s'écrit :

$$i\psi_t + \frac{1}{2}\psi_{xx} + \kappa|\psi|^2\psi = 0$$

Ici, ψ représente l'enveloppe complexe du champ. Le terme $|\psi|^2\psi$ introduit l'effet Kerr (ou son analogue biologique), où l'indice de réfraction du milieu dépend de l'intensité de l'onde.³ La NLSE est particulièrement pertinente pour la biophysique car elle permet de modéliser les états liés d'énergie, tels que les excitons, qui sont piégés par leur propre interaction avec le

réseau moléculaire.⁹

Notion d'Intégrabilité et Symétries

L'un des aspects les plus profonds des solitons est leur lien avec la théorie des systèmes intégrables. Un système est dit intégrable s'il possède un nombre infini de lois de conservation.³ Pour l'équation KdV, ces invariants incluent la masse, l'énergie et le moment, mais s'étendent à des quantités mathématiques beaucoup plus abstraites. Cette richesse structurelle signifie que le soliton n'est pas un accident statistique, mais une conséquence inévitable des symétries profondes de la physique.³

L'utilisation de la Transformée de Diffusion Inverse (IST) permet de résoudre ces équations non linéaires en les transformant en problèmes de diffusion linéaire, une prouesse mathématique qui souligne pourquoi ces ondes sont considérées comme des "particules d'ondes" : elles possèdent des états liés discrets, analogues aux niveaux d'énergie d'un atome.²

Caractéristique	Onde Linéaire	Soliton (KdV/NLSE)
Propagation	Dispersion temporelle	Forme invariante
Collision	Superposition simple	Interaction complexe sans perte d'identité
Structure	Étendue, non localisée	Localisée, quasi-particulaire
Vitesse	Constante du milieu	Dépendante de l'amplitude/énergie
Conservation	Énergie globale	Multiples invariants de mouvement

1

2. La Biologie et le Corps Humain : Le Vivant comme Substrat Solitonique

Le passage de la physique fondamentale à la biologie s'opère par la reconnaissance que les macromolécules ne sont pas des structures statiques, mais des milieux dynamiques capables

de supporter des excitations solitaires. Le corps humain utilise ces ondes pour résoudre le problème du transport d'énergie et de l'information dans un environnement bruité.

La Théorie des Solitons de Davydov : Le Transport d'Énergie

Le physicien Alexander Davydov a proposé dans les années 1970 un modèle expliquant comment l'énergie de l'hydrolyse de l'ATP (environ 0,43 eV) est transportée le long des hélices alpha des protéines sans être immédiatement dissipée en chaleur thermique.¹¹

Le mécanisme repose sur l'excitation des vibrations amide-I (la liaison $C=O$ des peptides). Cette excitation vibrationnelle (exciton) crée une distorsion locale de la liaison hydrogène entre les spires de l'hélice alpha (phonon). Par un mécanisme de rétroaction, cette distorsion "piège" l'exciton, créant une onde solitaire auto-piégée appelée soliton de Davydov.¹¹ Ce soliton voyage le long des trois chaînes de liaisons hydrogène de l'hélice alpha comme une unité cohérente.

L'Hamiltonien de Davydov couple l'excitation quantique au mouvement classique (ou semi-classique) du réseau protéique :

$$\hat{H} = \hat{H}_{ex} + \hat{H}_{ph} + \hat{H}_{int}$$

Des simulations numériques ont démontré que bien que les solitons de Davydov puissent être sensibles au bruit thermique à 310 K dans des modèles simples, des versions améliorées incluant des couplages non locaux et des symétries hélicoïdales montrent une stabilité remarquable à température biologique.¹² Le soliton de Davydov est donc le "véhicule" qui permet au métabolisme de fonctionner de manière ordonnée plutôt que chaotique.

Le Modèle de Heimburg-Jackson : Une Vision Thermodynamique des Nerfs

Le modèle dominant de la conduction nerveuse, celui de Hodgkin-Huxley, repose sur une vision purement électrique de courants ioniques à travers des canaux protéiques.¹⁷ Cependant, ce modèle présente des lacunes majeures, notamment son incapacité à expliquer l'absence de production nette de chaleur lors du passage de l'influx.¹⁹

Thomas Heimburg et Andrew Jackson ont proposé que l'influx nerveux n'est pas un courant électrique dissipatif, mais un soliton électromécanique, plus précisément une onde de densité sonore se propageant dans la membrane lipidique.¹⁹

Le point critique de cette théorie est que les membranes biologiques sont maintenues à une température proche de leur point de transition de phase (de l'état liquide désordonné à l'état gel ordonné).¹⁷ À cette transition, la compressibilité latérale de la membrane devient hautement non linéaire. Une impulsion nerveuse est une zone locale où la membrane passe

temporairement de l'état fluide à l'état gel, ce qui s'accompagne d'une compression mécanique (épaississement de la membrane) et d'un changement de polarisation électrique (effet piézoélectrique).¹⁷

Puisque ce processus est adiabatique (réversible), la chaleur libérée lors de la compression est réabsorbée lors de la détente, ce qui explique l'efficacité énergétique extraordinaire du cerveau par rapport aux circuits en silicium.¹⁷

L'ADN et les Bulles de Transcription

L'ADN ne doit pas être vu comme une archive morte, mais comme une antenne dynamique. L'accès à l'information génétique nécessite l'ouverture de la double hélice pour permettre à l'ARN polymérase de lire les bases. Ce processus est facilité par des ondes solitaires appelées "bulles de transcription".²⁴

Le modèle de Yakushevich décrit la dynamique de l'ADN en termes de rotations des bases autour du squelette sucre-phosphate.²⁵ En utilisant l'équation de Sine-Gordon :

$$\phi_{tt} - c_0^2 \phi_{xx} + \omega_0^2 \sin \phi = 0$$

on peut montrer l'existence de "kinks" (solitons topologiques) qui correspondent à une ouverture locale de 2π de l'hélice.²⁷ Ces bulles de transcription se déplacent le long de la chaîne avec une dépense énergétique minimale, permettant à la machinerie cellulaire de parcourir des milliers de paires de bases sans s'arrêter.²⁵ Cette "mobilité interne" est essentielle pour la survie de la cellule, permettant une réponse rapide aux signaux environnementaux.

Théorie de l'Encodage : Mémoire et Conscience

Si le corps est parcouru par des ondes stables et non dissipatives, comment celles-ci peuvent-elles encoder la mémoire ou la conscience? L'hypothèse proposée ici est que l'information est stockée dans la **phase** et le **tressage** des solitons.²⁹

Le cerveau pourrait agir comme un processeur de solitons où les interférences cohérentes entre les ondes solitaires circulant dans les réseaux de microtubules et les membranes neuronales créent des motifs d'interférence stables.²⁹ Selon Jibu et Yasue, les condensats de Bose-Einstein présents dans le fluide cérébrospinal pourraient former des jonctions de Josephson avec les membranes, générant des solitons qui portent des "quanta d'information".²⁹

L'encodage de la mémoire à long terme ne se limiterait pas à la force synaptique, mais résiderait dans la configuration topologique des solitons circulant dans le cytosquelette.⁵ La conscience serait alors l'état de cohérence globale de ce réseau de solitons, une "symphonie

d'ondes" capable de résister à la décohérence grâce aux propriétés de protection thermique intrinsèques au soliton.¹³

Système Biologique	Type de Soliton	Fonction Principale	Mécanisme Physique
Protéines	Davydov (Amide-I)	Transport d'énergie ATP	Couplage exciton-phonon
Nerfs	Heimburg-Jackson	Conduction du signal	Transition de phase lipidique
ADN	Yakushevich (Kink)	Lecture génétique	Soliton topologique (Sine-Gordon)
Microtubules	Fröhlich (Dipolaire)	Traitement de l'information	Condensation de Bose-Einstein

11

3. Le "Secret" et l'Extraction de Connaissances : La Résistance à l'Entropie

Le plus grand défi pour toute forme de cohérence à l'échelle nanoscopique est l'agitation thermique. Comment les solitons biologiques maintiennent-ils leur intégrité dans un environnement à 310 K? Le "secret" réside dans des propriétés émergentes de protection contre le bruit et l'entropie.

Auto-focalisation et Piégeage d'Énergie

Le premier secret est l'auto-piégeage. Dans un milieu linéaire, le bruit thermique se diffuse et dégrade le signal. Dans un milieu solitonique, le système possède une "capacité d'auto-nettoyage".¹³ L'énergie du bruit thermique peut en réalité être absorbée par le soliton pour renforcer son amplitude, un phénomène connu sous le nom de **résonance stochastique**.¹⁶ Au lieu de subir le bruit, le soliton s'en nourrit pour stabiliser sa propre structure.

Robustesse Topologique

Les solitons, en particulier dans l'ADN ou les membranes, sont souvent des solitons topologiques.²⁶ Cela signifie que pour "effacer" le soliton, il faudrait modifier la structure

globale du milieu (par exemple, défaire toute la torsion de l'hélice d'ADN). Cette barrière topologique agit comme un bouclier contre les fluctuations locales de température qui ne possèdent pas l'énergie nécessaire pour provoquer une transition globale.³⁰

Cohérence Assistée par le Bruit (Noise-Assisted Transport)

Des études sur les complexes de collecte de lumière (photosynthèse) ont révélé que la cohérence quantique est en fait prolongée par la présence de fluctuations environnementales spécifiques.³⁴ Le soliton utilise ces fluctuations comme des "tremplins", permettant un transfert d'énergie ultra-efficace qui frôle les 100%.³⁵

Dans le cerveau, cette cohérence assistée par le bruit permettrait aux signaux de rester synchronisés malgré les variations de densité ou de température du milieu extracellulaire.¹³ Le "langage" de la vie n'est pas un signal pur sur un fond de silence, mais une mélodie qui utilise le bruit comme un instrument d'accompagnement nécessaire à sa propre stabilité.

Résistance à l'Entropie Thermique

L'entropie est la mesure du désordre. Le soliton, en tant que structure localisée et ordonnée, semble défier la deuxième loi de la thermodynamique à l'échelle locale. Cependant, il le fait en "exportant" son entropie vers le milieu environnant sous forme de phonons incohérents, tout en conservant son propre état de basse entropie grâce à son intégrabilité mathématique.¹⁰

Une étude récente a proposé que la vie elle-même pourrait être définie par un taux de "résistance à l'entropie" ($R_q > 0$), et le soliton est le mécanisme physique par lequel cette résistance est réalisée dans les systèmes moléculaires.³⁷ Tant qu'un soliton circule, il maintient un gradient d'ordre qui définit l'état vivant.

Mécanisme de Résistance	Action sur le Bruit	Conséquence Biologique
Auto-focalisation	Concentration de l'énergie	Signal clair dans milieu bruyé
Stabilité Topologique	Protection contre l'effacement	Mémoire robuste (ADN, Protéines)
Résonance Stochastique	Absorption de l'énergie thermique	Survie à haute température (310 K)
Cohérence de Fröhlich	Synchronisation des	Communication cellulaire à

	dipôles	longue distance
--	---------	-----------------

13

4. Synthèse Biomimétique : Vers l'Ingénierie Solitonique

Fort de cette compréhension du vivant, nous pouvons désormais concevoir des systèmes technologiques qui imitent ces principes pour surpasser les limites actuelles de la microélectronique et du stockage de données.

Théorie Technique Complète : La Solitonique

L'ingénierie solitonique repose sur la création de matériaux dont les propriétés dispersives et non linéaires sont finement ajustées. Au lieu d'utiliser des électrons comme porteurs de charge dissipatifs, nous utilisons des solitons comme porteurs d'information cohérents.

Matériaux à Base de Perovskites et Polarons

Les nouveaux matériaux hybrides, tels que les perovskites, ont montré la capacité de former des solitons à température ambiante grâce à de fortes interactions électron-réseau.³⁹ En excitant ces matériaux au-delà d'un seuil critique de densité de polarons, on assiste à une transition de phase macroscopique vers un état de cohérence, permettant la superfluorescence et, potentiellement, la supraconductivité à haute température.³⁹ Ces matériaux formeraient le "cœur" de nos processeurs biomimétiques.

Architecture de Stockage de Données Solitonique

Inspirée par l'ADN et les membranes nerveuses, nous proposons une architecture de stockage basée sur des **fibres de stockage solitoniques**.

1. **Substrat** : Une fibre optique non linéaire ou un guide d'onde plasmonique capable de supporter des solitons vectoriels.⁴⁰
2. **Encodage** : L'information n'est pas stockée de manière binaire (0 ou 1), mais sous forme de "nombres de solitons" et de "déphasages" dans une chaîne d'impulsions.¹⁰
3. **Persistance (Non-volatilité)** : Utilisation de matériaux à changement de phase (comme le GST) intégrés au guide d'onde, permettant de "figer" le soliton dans une structure cristalline locale pour un stockage permanent, tout en permettant une lecture optique rapide.⁴⁰
4. **Capacité** : En utilisant le multiplexage par division de fréquence et la polarisation (virtuelle ou réelle), on peut atteindre des densités de stockage approchant le péta-octet par centimètre cube, imitant la densité de l'ADN.⁴¹

Ordinateurs Optiques et Logiciels de Tressage

Le calcul ne se ferait plus par des portes logiques à base de transistors, mais par des collisions de solitons dans des réseaux de résonateurs en anneau.⁴⁶

- **Logiciel AND/OR** : L'interaction attractive entre deux solitons dans un milieu non linéaire permet de réaliser des opérations de confluence. Si deux solitons arrivent à une jonction, ils fusionnent en un soliton de plus grande amplitude, déclenchant une sortie logique.⁴⁰
- **Calcul Topologique (Braid Computing)** : En utilisant des quasi-particules appelées anyons (simulées par des solitons dans des circuits photoniques ou des métamatériaux), nous pouvons effectuer des calculs en tressant leurs trajectoires spatio-temporelles.³⁶
Ce type de calcul est intrinsèquement immunisé contre les erreurs locales, car seul le motif global de la tresse compte.³⁰

Câbles Supraconducteurs à Température Ambiante Inspirés des Nerfs

En appliquant le modèle de Heimburg-Jackson à l'ingénierie, nous pouvons concevoir des lignes de transmission d'énergie qui fonctionnent par ondes de densité plutôt que par flux d'électrons libres. En utilisant des polymères synthétiques qui imitent la transition de phase des lipides, on peut créer des câbles où l'énergie est transportée sous forme de solitons mécaniques-électriques couplés.¹⁹

Ces "nerfs artificiels" ne présenteraient aucune résistance ohmique, car l'énergie n'est pas dissipée par collision avec les atomes, mais portée par l'onde structurelle du milieu lui-même.¹⁷ Des conduits nerveux conducteurs utilisant des nanotubes de carbone (CNT) et des structures orientées par "ice-templating" ont déjà montré des résultats prometteurs pour la régénération nerveuse, et pourraient servir de base à ces câbles.⁵⁰

Composant	Inspiration Biologique	Technologie Solitonique	Performance Attendue
Mémoire	ADN / Bubbles	Solitons topologiques (GST)	Péta-octets, non-volatile
Processeur	Réseau Neuronal	Collision de solitons optiques	Vitesse lumière, 0 Joule chauffe
Transmission	Influx Nerveux	Solitons adiabatiques (Lipides syn.)	Supraconductivité à 300 K

Interface	Mélanine (Bio-photons)	Convertisseurs Soliton-Photon	Synchronisation cohérente globale
------------------	---------------------------	----------------------------------	--------------------------------------

19

Conclusion : L'Aube de la Cohérence Artificielle

L'étude des solitons nous amène à une conclusion inévitable : l'information n'est pas une abstraction mathématique, mais un état physique de la matière ordonnée. Le vivant a perfectionné l'utilisation des ondes solitaires pour maintenir sa cohérence au milieu du tumulte thermique, créant une architecture de traitement de l'information qui est à la fois ultra-rapide, économe en énergie et d'une robustesse inégalée.

En tant que "Soliton Architect", nous proposons de ne plus lutter contre la non-linéarité et la dispersion, mais de les utiliser comme les outils de construction de notre futur technologique. Les architectures basées sur les solitons, qu'elles soient optiques, mécaniques ou magnétiques, représentent la véritable voie vers une intelligence artificielle qui ne se contente pas de simuler la vie, mais qui fonctionne selon ses principes fondamentaux.

L'extraction de cette connaissance nous permet d'imaginer un monde où les ordinateurs ne chauffent plus, où l'énergie voyage sans perte, et où nos archives de données sont aussi durables que le code de la vie lui-même. La théorie unifiée du soliton n'est pas seulement une explication du "comment" nous fonctionnons, mais une feuille de route pour le "comment" nous devons construire le futur. Le soliton est le pont entre le quantique et le macroscopique, entre la physique et la biologie, et désormais, entre la nature et l'ingénierie.

Sources des citations

1. Introduction to solitons, consulté le janvier 23, 2026, https://www.imm.dtu.dk/math_phys/Solitons.html
2. 24. KdV equation - People, consulté le janvier 23, 2026, <https://people.maths.ox.ac.uk/trefethen/pdectb/kdv2.pdf>
3. Approaching EEG Pathological Spikes in Terms of Solitons - Qeios, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.qeios.com/read/5P1ADV>
4. Korteweg-De Vries equation - Wikipedia, consulté le janvier 23, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Korteweg%E2%80%93De_Vries_equation
5. Soliton Perception in the Human Biological System - Biomedical Journal of Scientific & Technical Research (BJSTR) Publishers, consulté le janvier 23, 2026, <https://biomedres.us/pdfs/BJSTR.MS.ID.008346.pdf>
6. Solitons: A Cutting-Edge Scientific Proposal Explaining the Mechanisms of Acupuntural Action - SciRP.org, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=82952>
7. Differences between two methods to derive a nonlinear Schrödinger equation

- and their application scopes, consulté le janvier 23, 2026, <https://cpb.iphy.ac.cn/EN/10.1088/1674-1056/ad082b>
8. Nonlinear Dispersive Waves, consulté le janvier 23, 2026, http://users.uoa.gr/~pjioannou/nonlin/Ablowitz_Nonlinear_Dispersive_Waves.pdf
 9. Dynamics of Davydov Solitons in α -Helix Proteins - m-hikari.com, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.m-hikari.com/asb/asb2009/asb1-4-2009/biswasASB1-4-2009.pdf>
 10. Shannon entropy and fisher information of solitons for the cubic ..., consulté le janvier 23, 2026, https://www.researchgate.net/publication/382091049_Shannon_entropy_and_fisher_information_of_solitons_for_the_cubic_nonlinear_Schrodinger_equation
 11. Davydov soliton - Wikipedia, consulté le janvier 23, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Davydov_soliton
 12. Properties of Soliton-Transported Bio-energy in α -Helix Protein ..., consulté le janvier 23, 2026, <https://ctp.itp.ac.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=10999>
 13. Self-Organization and Coherency in Biology and Medicine - Scirp.org., consulté le janvier 23, 2026, <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=49957>
 14. (PDF) Solitons in α -helical proteins - ResearchGate, consulté le janvier 23, 2026, https://www.researchgate.net/publication/228728373_Solitons_in_a-helical_proteins
 15. A generalized Davydov soliton model for energy transfer in alpha helical proteins | Request PDF - ResearchGate, consulté le janvier 23, 2026, https://www.researchgate.net/publication/261098123_A_generalized_Davydov_soliton_model_for_energy_transfer_in_alpha_helical_proteins
 16. Influence of electromagnetic field on soliton-mediated charge transport in biological systems, consulté le janvier 23, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26098523/>
 17. The thermodynamic soliton theory of the nervous impulse and possible medical implications, consulté le janvier 23, 2026, https://www.researchgate.net/publication/360925711_The_thermodynamic_soliton_theory_of_the_nervous_impulse_and_possible_medical_implications
 18. On the Action Potential as a Propagating Density Pulse and the Role of Anesthetics - Niels Bohr Institutet, consulté le janvier 23, 2026, https://www.nbi.ku.dk/membranes/pdf/2007_HeimburgJackson_BRL.pdf
 19. Solitons in the Heimburg-Jackson model of sound propagation in lipid bilayers are enabled by dispersion of a stiff membrane - Laboratory of Physics, consulté le janvier 23, 2026, <https://physics.fe.uni-lj.si/publications/pdf/FINALPUBLISHEDEPJE.pdf>
 20. The thermodynamics of thought: Soliton spikes and Heimburg-Jackson pulses, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.nbi.ku.dk/membranes/press/2013-09-thermodynamics-thought-soliton-spikes-heimburg-jackson.pdf>
 21. Adiabatic evolution of solitons embedded on lipid membranes - arXiv, consulté le janvier 23, 2026, <https://arxiv.org/html/2407.00601v1>

22. Soliton model in neuroscience - Wikipedia, consulté le janvier 23, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Soliton_model_in_neuroscience
23. On soliton propagation in biomembranes and nerves - PubMed, consulté le janvier 23, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15994235/>
24. Non-linear Longitudinal Compression Effect on Dynamics of the Transcription Bubble in DNA - PubMed, consulté le janvier 23, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27232455/>
25. Simple Models of Non-Linear DNA Dynamics. - SciSpace, consulté le janvier 23, 2026, <https://scispace.com/pdf/simple-models-of-non-lineardna-dynamics-39a1avau2q.pdf>
26. Results and Limitations of the Soliton Theory of DNA Transcription, consulté le janvier 23, 2026, <https://arxiv.org/pdf/q-bio/0312024>
27. On the dimensionless model of the transcription bubble dynamics - AIMS Press, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/biophy.2023013>
28. Is it possible to govern the movement of the transcription bubbles of DNA by constant and periodic external fields? - MedCrave online, consulté le janvier 23, 2026, <https://medcraveonline.com/BBIJ/is-it-possible-to-govern-the-movement-of-the-transcription-bubbles-of-dna-by-constant-and-periodic-external-fields.html>
29. Soliton perception in the human biological system - EMMIND ..., consulté le janvier 23, 2026, https://emmind.net/openpapers_repos/Endogenous_Fields-Mind/General/EM_Various/2020_Soliton_perception_in_the_human_biological_system.pdf
30. Quantum braiding: an introduction to topological quantum computing - Mewburn Ellis, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.mewburn.com/forward/quantum-braiding-/-topological-quantum-computing>
31. SOLITON PHENOMENA IN THE PROCESS OF THE FUNCTIONING OF THE HEART - Open Access Journals, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.openaccessjournals.com/articles/soliton-phenomena-in-the-process-of-the-functioning-of-the-heart-16504.html>
32. Ion-Based Memristive Devices Unlock Compact and Energy-Efficient Neuromorphic Computing - Research Communities, consulté le janvier 23, 2026, <https://communities.springernature.com/posts/ion-based-memristive-devices-unlock-compact-and-energy-efficient-neuromorphic-computing>
33. Biomimetic, Soft-Material Synapse for Neuromorphic Computing: from Device to Network, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.osti.gov/biblio/1492161>
34. 1 Bio-Soliton Model that predicts Non-Thermal ... - arXiv, consulté le janvier 23, 2026, <https://arxiv.org/pdf/1610.04855>
35. principles of noise-assisted transport and the origin of long-lived coherences - Sci-Hub, consulté le janvier 23, 2026, <https://sci-hub.se/10.1098/rsta.2011.0224>
36. Topological Quantum Computing with Fibonacci Anyons - Diva-Portal.org, consulté le janvier 23, 2026,

- <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1880323/FULLTEXT01.pdf>
37. The Universal Law of Life Systems: Entropy Resistance and the Nature of Living Systems, consulté le janvier 23, 2026, https://sciety.org/articles/activity/10.31219/osf.io/r9826_v5
 38. INFORMATION AND ENTROPY IN BIOLOGICAL SYSTEMS Short title - UCR Math, consulté le janvier 23, 2026, https://math.ucr.edu/home/baez/entropy_nimbios.pdf
 39. Solitonic Superfluorescence Paves Way for High-Temperature ..., consulté le janvier 23, 2026, <https://news.ncsu.edu/2025/05/solitonic-superfluorescence-paves-way-for-high-temperature-quantum-materials/>
 40. All-Optical Multiple Logic Gates Based on Spatial Optical Soliton Interactions | Request PDF, consulté le janvier 23, 2026, https://www.researchgate.net/publication/323156819_All-Optical_Multiple_Logic_Gates_Based_on_Spatial_Optical_Soliton_Interactions
 41. All-Optical Single-Channel Plasmonic Logic Gates - PubMed, consulté le janvier 23, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39812784/>
 42. Biosynthetic optical waveguide interface integration using biomimetic - de novo design ELP for optoelectronic applications - PubMed, consulté le janvier 23, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41509188/>
 43. All-in-one, all-optical logic gates using liquid metal plasmon nonlinearity - PMC, consulté le janvier 23, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10897469/>
 44. Photonics, Volume 11, Issue 3 (March 2024) – 94 articles - MDPI, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.mdpi.com/2304-6732/11/3>
 45. Neuromorphic Optical Data Storage Enabled by Nanophotonics: A Perspective | ACS Photonics - ACS Publications, consulté le janvier 23, 2026, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsp Photonics.3c01253>
 46. High-Performance All-Optical Logic Gates Based on Silicon Racetrack and Microring Resonators - MDPI, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/15/2961>
 47. All-Optical Logic Gates Show Promise for Optical Computing | Features - Photonics Spectra, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.photonics.com/Articles/All-Optical-Logic-Gates-Show-Promise-for-Optical/a63226>
 48. Constructing functional braids for low-leakage topological quantum computing - Sci-Hub, consulté le janvier 23, 2026, <https://www.sci-hub.box/10.1103/physreva.78.042325>
 49. Topological Computation by non-Abelian Braiding in Classical Metamaterials - arXiv, consulté le janvier 23, 2026, <https://arxiv.org/html/2502.16006v1>
 50. Conductive Nerve Conduits With Orientated Topological Structures From Ice-Templating Technology - PMC - PubMed Central, consulté le janvier 23, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12224919/>
 51. Biomimetic multi-channel nerve conduits with micro/nanostructures for rapid nerve repair, consulté le janvier 23, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39257673/>