

L'Effet Zénon Quantique comme algorithme de correction d'erreurs dans le stockage de données sur ADN

Ruben Gariazzo

étudiant à l'école polytechnique féminine

RÉSUMÉ

L'utilisation de l'ADN synthétique pour l'archivage de données à haute densité fait face à des défis majeurs liés aux altérations moléculaires. Des études récentes ont modélisé l'impact de l'effet tunnel des protons dans les paires de bases, générant des tautomères¹ transitoires responsables de mutations spontanées. Cet article explore l'hypothèse théorique de l'application de l'effet Zénon quantique pour geler la fonction d'onde de ces protons et prévenir les mutations à la source. Par une approche pluridisciplinaire combinant thermodynamique de l'information, optique quantique et chimie structurale, nous démontrons que les limitations de nos technologies actuelles rendent cette méthode irréalisable en l'état. Nous établissons un théorème de non-viabilité énergétique du contrôle Zénon d'ADN de stockage quantifiant les limites structurelles (énergies de localisation dépassant le seuil de rupture des liaisons phosphodiester) et thermodynamiques (dissipation thermique régie par le principe de Landauer). L'article se conclut par une feuille de route classant des propositions technologiques et algorithmiques alternatives adaptées aux capacités de l'ingénierie contemporaine.

NOMENCLATURE

N	Nombre total de paires de bases dans l'archive (ex. 5×10^{15} pour 1 Pétaoctet)
τ	Temps caractéristique du transfert de proton par effet tunnel ($\sim 10^{-12}$ s)
Δt	Intervalle de temps entre deux mesures successives de l'effet Zénon
Δx	Incertitude spatiale ou résolution spatiale de la mesure ($\leq 0,1$ nm)
E_L	Énergie minimale dissipée par opération irréversible (Limite de Landauer)
P	Puissance thermique minimale dissipée par le système de contrôle

1. INTRODUCTION ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

L'hybridation des technologies de l'information et de la biologie moléculaire a fait émerger l'ADN synthétique comme un candidat de premier plan pour le stockage de données à long terme. Les recherches

1. Tautomères : Isomères de constitution interconvertibles par la migration intramoléculaire réversible d'un atome ou d'un groupe d'atomes, ici le déplacement d'un atome d'hydrogène modifiant les liaisons d'une base nucléotidique.

fondamentales menées par Church et al. [1] et Goldman et al. [2] ont validé la capacité de l'ADN à stocker des pétaoctets d'informations dans un volume microscopique, tout en garantissant une stabilité s'étendant potentiellement sur plusieurs millénaires. Cependant, bien que la macromolécule¹ soit extrêmement robuste, la fidélité de l'information reste sujette à des altérations dues à des erreurs de synthèse, de séquençage, ainsi qu'à des dégradations spontanées.

Si la majeure partie de ces erreurs provient de facteurs biochimiques classiques, des phénomènes relevant de la mécanique quantique interviennent également à l'échelle atomique. Dès 1965, Per-Olov Löwdin a suggéré que les protons assurant les liaisons hydrogène entre les bases nucléotidiques pouvaient subir un effet tunnel² [3]. Plus récemment, les travaux *in silico* de Slocombe, Al-Khalili et Sacchi ont modélisé avec précision ce transfert de protons au sein de l'ADN, démontrant l'apparition d'états tautomériques transitoires responsables de mutations spontanées lors des phases de réplication [4].

Dans ce contexte, une hypothèse théorique séduisante consisterait à exploiter l'effet Zénon quantique pour neutraliser ces erreurs à la source. Décrit par Misra et Sudarshan en 1977 [5], l'effet Zénon quantique postule qu'une observation continue d'un système quantique instable fige son évolution, maintenant sa probabilité de survie dans son état initial proche de l'unité. Des études approfondies sur la dynamique de cet effet, telles que celles menées par Facchi et Pascazio [6], ont confirmé sa validité expérimentale dans divers systèmes isolés rigoureusement contrôlés.

Toutefois, ces propositions théoriques sur l'effet Zénon se limitent historiquement à des environnements quantiques hautement idéalisés. Elles omettent de prendre en compte la mécanique complexe des polymères et les coûts thermodynamiques d'un couplage macroscopique. À l'inverse, la littérature existante sur le stockage ADN se concentre quasi exclusivement sur la correction d'erreurs biochimiques ou algorithmiques.

Notre contribution comble cette lacune interdisciplinaire. Nous formaliserons ces contraintes sous la forme d'un théorème de non-viabilité énergétique du contrôle Zénon d'ADN de stockage (que nous appellerons par la suite « théorème de *no-go* ADN-Zénon »). Par « cadre d'impossibilité », nous entendons un ensemble d'hypothèses (H1–H4) explicitement formulées, conduisant à des bornes quantitatives (i–ii) qui rendent tout schéma de contrôle Zénon actif d'archives ADN de stockage mécaniquement destructeur et énergétiquement non viable.

Nous démontrons ainsi que, même dans un scénario d'observation idéal, le maintien d'un tel contrôle exigerait une résolution spatiale sub-nanométrique impliquant des énergies de sonde de l'ordre de 12,4 keV. Ces valeurs dépassent de près de trois mille fois le seuil physique de rupture des liaisons phosphodiester de l'ADN (4,14 eV). De surcroît, à l'échelle d'une archive d'un Pétaoctet, les limites thermodynamiques imposées par le principe de Landauer dicteraient une dissipation thermique minimale inévitable

1. Macromolécule : Molécule de très grande taille, constituée de la répétition de nombreuses sous-unités (monomères), comme c'est le cas pour les polymères d'ADN.

2. Effet tunnel : Phénomène quantique permettant à une particule de franchir une barrière de potentiel énergétique théoriquement infranchissable en mécanique classique, en raison de l'extension spatiale de sa fonction d'onde.

de 14,35 MW.

S'adressant conjointement aux théoriciens de l'information quantique, aux biophysiciens et aux ingénieurs en architecture de données, ce résultat est crucial : il démontre formellement qu'investir dans la recherche d'une stabilisation quantique active de l'ADN est une voie fondamentalement sans issue. L'ingénierie des systèmes doit par conséquent réallouer ses efforts vers des solutions éprouvées et réalisables (ingénierie du substrat XNA, schémas de codage classiques avancés, prédiction par apprentissage automatique). La Figure 1 résume visuellement le cheminement logique de notre étude.

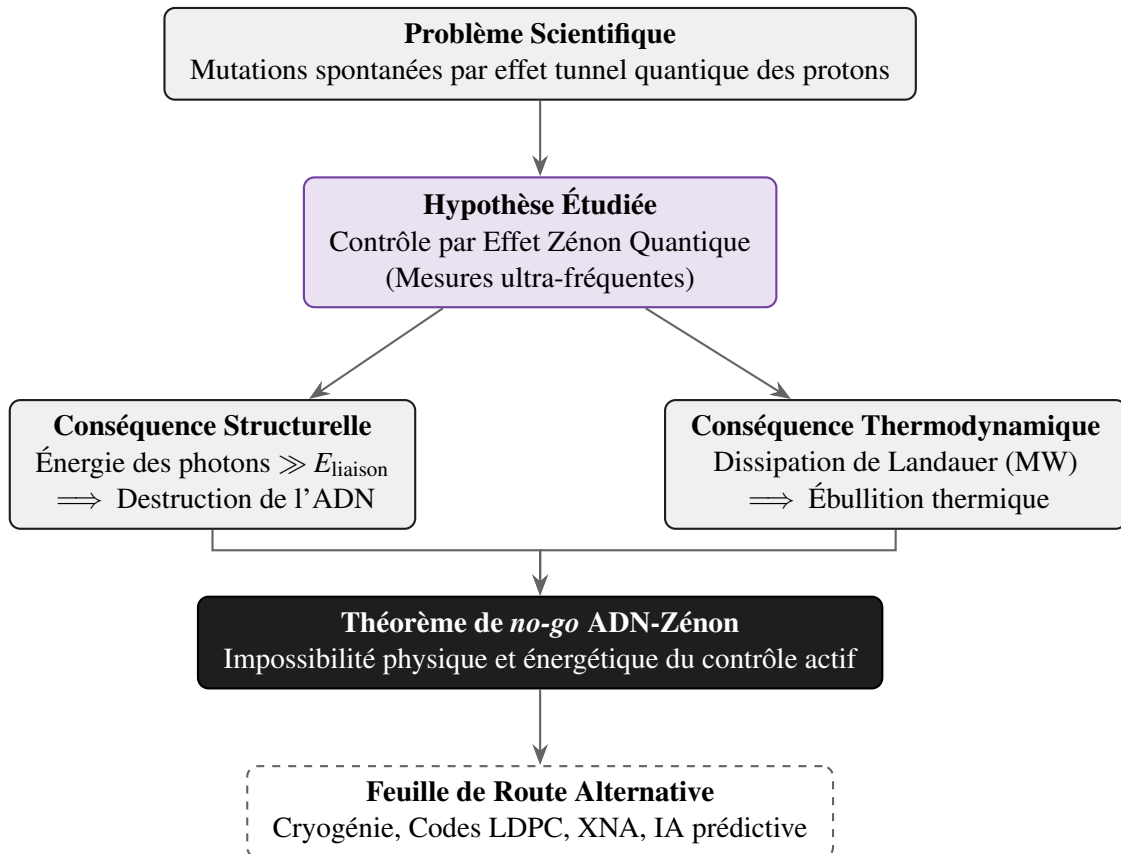


FIGURE 1 – *Schéma général de l'étude*. Le cheminement logique démontre comment la tentative de correction quantique (Effet Zénon) engendre des contraintes structurelles et thermodynamiques insurmontables, motivant la formalisation du théorème d'impossibilité et orientant la recherche vers des alternatives viables.

2. CADRE MÉTHODOLOGIQUE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Pour évaluer rigoureusement la faisabilité d'un contrôle quantique sur un pool d'ADN de stockage, nous employons une approche fondée sur des estimations d'ordres de grandeur¹ (OOM - *Order Of Magnitude*) appliquées au scénario le plus défavorable (*worst-case bounds*). Ce choix garantit l'évaluation des limites

1. Ordre de grandeur : Évaluation approximative d'une quantité physique, exprimée généralement en puissance de 10, permettant de vérifier la viabilité d'un concept.

absolues du système physique sans dépendre d’optimisations d’ingénierie mineures.

Le système modélisé est un centre d’archivage exascale¹ standard, contenant un Pétaoctet (1 Po) de données numériques. Compte tenu des algorithmes d’encodage et des amorces nécessaires à l’adressage (comme documenté par Organick et al. [14]), cette capacité représente environ $N = 5 \times 10^{15}$ paires de bases d’ADN synthétique. L’intervalle de temps caractéristique de l’effet tunnel des protons au sein des liaisons hydrogène, noté τ , est fixé à 10^{-12} s, conformément aux dynamiques vibrationnelles calculées par Slocombe et al. [4]. Les grandeurs que nous cherchons à borner sont l’énergie par mesure quantique transférée à la molécule, ainsi que la dissipation thermique globale du système de stockage par unité de temps, afin de les comparer aux tolérances structurelles et écologiques de l’ADN.

3. MODÈLES D’ERREURS : CLASSIQUE CONTRE QUANTIQUE

Afin de contextualiser la nécessité d’un contrôle quantique, il est impératif de visualiser l’origine physique du phénomène (Figure 2) et de comparer quantitativement les sources d’erreurs affectant le canal de communication de l’ADN, décrit par Heckel et al. [13]. La thèse selon laquelle la correction par effet Zénon serait indispensable repose sur l’hypothèse que les mutations par effet tunnel constituent une menace prépondérante. Les données expérimentales actuelles invalident ce postulat.

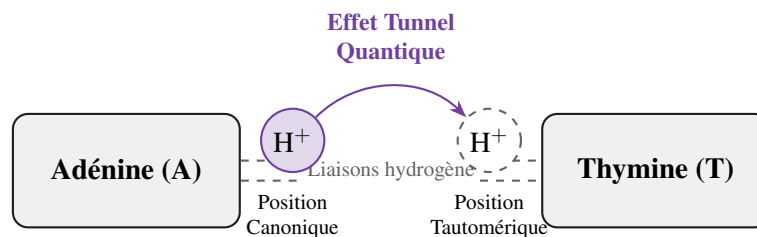


FIGURE 2 – *Représentation schématique du transfert de proton par effet tunnel dans une paire de bases.* Le proton (H^+) constituant la liaison hydrogène possède une probabilité non nulle de franchir la barrière énergétique, transformant la base canonique en une forme tautomérique instable, source de mutations lors de la réplication.

Les erreurs biochimiques et mécaniques, inhérentes à nos méthodes actuelles de manipulation, dominent largement le budget d’erreur. Lors de la synthèse de l’ADN (généralement via la méthode des phosphoramidites), le taux d’erreur par insertion, délétion ou substitution s’élève à environ 10^{-2} par base. Lors de la lecture, les technologies de séquençage par nanopores² génèrent des taux d’erreur compris entre 5×10^{-2} et 10^{-1} , tandis que le séquençage optique (type Illumina) atteint environ 10^{-3} par base [13]. En comparaison, le modèle de dynamique quantique ouvert estime la probabilité d’une mutation spontanée induite par l’effet tunnel protonique, survivant aux mécanismes de réplication, à environ 10^{-8} par base

1. Exascale : Désigne des systèmes informatiques capables d’effectuer un milliard de milliards (10^{18}) d’opérations par seconde, ou par extension, de stocker des volumes de données immenses (Exaoctets).

2. Séquençage par nanopores : Technologie de lecture de l’ADN consistant à faire passer le brin à travers un trou nanométrique et à mesurer les variations de courant électrique induites par chaque base.

[4].

La correction quantique s'attaque donc à un phénomène dont la probabilité d'occurrence est un million de fois inférieure à celle des erreurs de synthèse classique. Par conséquent, la correction par effet Zénon se révèle non seulement physiquement inatteignable avec nos capacités actuelles, mais également numériquement marginale face au profil d'erreur global.

4. FORMALISATION DE L'ALGORITHME DE ZÉNON QUANTIQUE

Le principe de l'effet Zénon quantique, illustré de manière conceptuelle à la Figure 3, repose sur la perturbation volontaire de l'évolution d'un système quantique [5, 6]. Bien que le titre de cet article évoque un algorithme, la littérature omet souvent d'en définir la structure formelle. Un algorithme de correction d'erreurs par effet Zénon appliqué à l'ADN se définirait par un processus itératif composé de phases d'évolution et de projections.

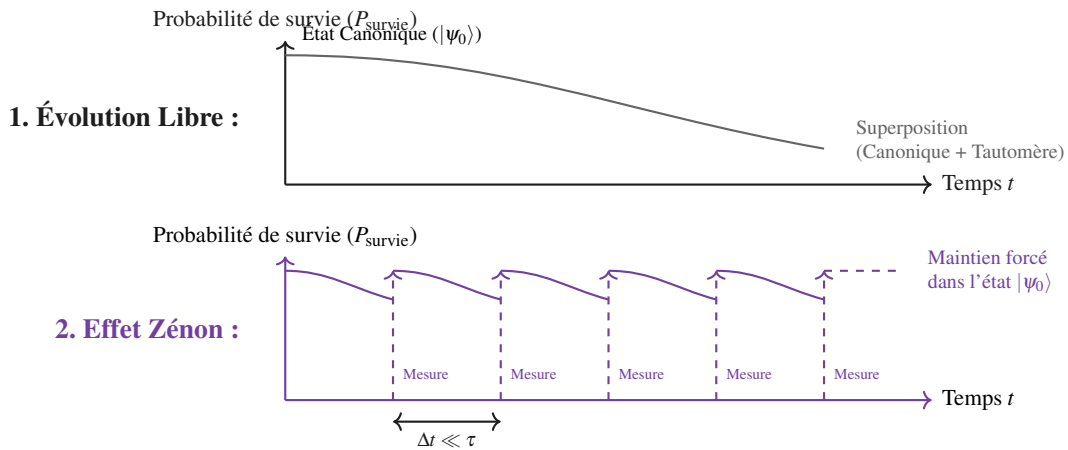


FIGURE 3 – *Principe de l'effet Zénon quantique.* En l'absence d'observation (Scénario 1), la probabilité de survie de l'état initial décroît à mesure que le système évolue librement vers l'état tautomérique. Sous l'action de mesures projectives très fréquentes (Scénario 2), l'évolution cohérente est constamment interrompue, confinant le proton dans son état initial canonique.

Soit le système préparé dans un état initial canonique, représenté par le ket $|\psi_0\rangle$. L'évolution libre du système sur un intervalle de temps Δt est régie par l'opérateur d'évolution unitaire $U(\Delta t) = \exp\left(-\frac{iH\Delta t}{\hbar}\right)$, menant à une superposition cohérente entre l'état canonique et l'état tautomérique (l'erreur).

L'algorithme consisterait à appliquer, à intervalles réguliers $\Delta t \ll \tau$, un opérateur de mesure projective $P_{\text{canonique}} = |\psi_0\rangle\langle\psi_0|$. À chaque itération, la fonction d'onde effondrée serait formellement décrite par l'expression suivante :

$$|\psi(t)\rangle = \left(P_{\text{canonique}} \exp\left(-\frac{iH\Delta t}{\hbar}\right) \right)^N |\psi_0\rangle$$

Dans cette expression, N représente le nombre de mesures effectuées, tel que $t = N\Delta t$. Pour que cet algorithme garantisse la préservation de la donnée, la probabilité de survie $P(t) = |\langle \psi_0 | \psi(t) \rangle|^2$ doit rester proche de 1, ce qui impose d'interfacer physiquement l'ADN avec un dispositif de mesure macroscopique capable d'implémenter l'opérateur $P_{\text{canonique}}$ sur 10^{15} bases simultanément et en continu. La Figure 4 compare les trajectoires temporelles d'une paire de bases avec et sans l'application d'un tel algorithme de contrôle Zénon [5, 6].

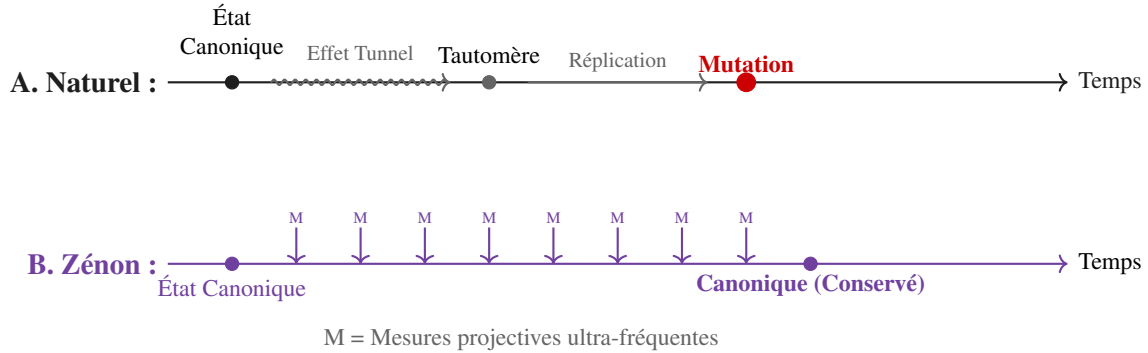


FIGURE 4 – *Chronologie de l'apparition des mutations et de leur prévention théorique.* Le scénario naturel (A) laisse l'effet tunnel aboutir à une mutation permanente lors de la réplication de l'ADN. Le scénario théorique sous contrôle Zénon (B) impose des mesures (M) à une fréquence extrêmement élevée pour interdire la tautomérisation.

5. DYNAMIQUE DE L'EFFET TUNNEL ET INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT

Pour comprendre pourquoi la mesure est nécessaire, il faut modéliser la dynamique naturelle du proton au sein de son environnement biochimique. La Figure 5 schématise ce couplage fondamental. Dans le cadre de cette étude, le transfert de proton n'est pas modélisé comme un système isolé, mais comme un système quantique ouvert interagissant avec son environnement biologique fluctuant.

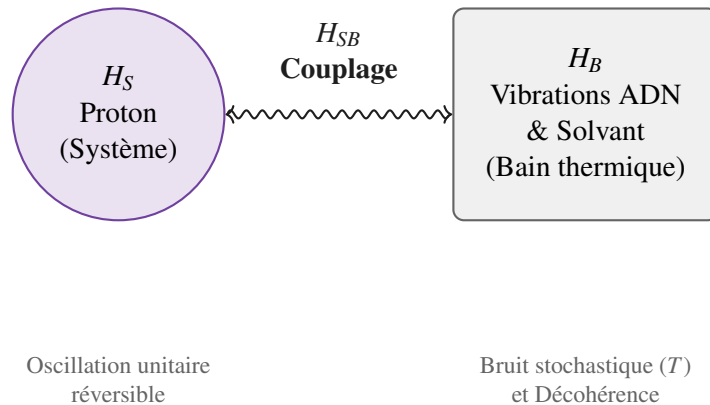


FIGURE 5 – *Représentation conceptuelle du système quantique ouvert.* Le proton (H_S) n'est pas isolé mais interagit perpétuellement via H_{SB} avec un bain thermique (H_B) constitué par le reste de la macromolécule et le solvant, induisant des échanges d'énergie et une perte d'information quantique.

L'Hamiltonien total H ¹ du système s'exprime ainsi comme la somme de trois composantes fondamentales :

$$H = \underbrace{H_S}_{\text{Système}} + \underbrace{H_B}_{\text{Bain thermique}} + \underbrace{H_{SB}}_{\text{Interaction système-bain}}$$

Dans cette équation, H_S représente l'énergie propre du proton isolé naviguant dans le puits de potentiel asymétrique de la liaison hydrogène. La composante H_B décrit l'énergie du bain thermique environnant (les vibrations stochastiques du reste de la macromolécule d'ADN et du solvant environnant). Enfin, le terme H_{SB} quantifie le couplage spécifique entre le proton et ce bain, responsable des inévitables échanges d'énergie et d'information avec le milieu.

L'évolution de l'état quantique du proton, après avoir moyenné les effets complexes de cet environnement, est décrite par la matrice densité réduite² $\rho_S(t)$. Sa dynamique temporelle est régie par l'équation maîtresse de Caldeira-Leggett :

$$\frac{d\rho_S}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H_S, \rho_S] - \frac{i\gamma}{\hbar}[x, \{p, \rho_S\}] - \frac{2m\gamma k_B T}{\hbar^2}[x, [x, \rho_S]]$$

Cette équation différentielle est cruciale car elle capture la compétition entre les effets purement quantiques et l'influence classique de l'environnement. Le premier terme décrit l'évolution unitaire pure, c'est-à-dire l'oscillation quantique réversible par effet tunnel entre les deux brins d'ADN, dictée par le commutateur de l'Hamiltonien et de la matrice densité.

Les termes suivants introduisent l'influence perturbatrice de l'environnement. Le deuxième terme, proportionnel à l'anticommutateur impliquant la position x et l'impulsion p , traduit la dissipation de l'énergie (la friction quantique) vers le bain thermique. Le troisième terme, qui dépend du double commutateur de la position, modélise les fluctuations thermiques responsables de la décohérence³. Ce processus de décohérence environnementale est schématisé à la Figure 6.

C'est ce dernier processus qui détruit rapidement la superposition quantique du proton, forçant le système à choisir un état défini. Dans cette formulation, γ représente le taux d'amortissement macroscopique, m la masse effective du proton, k_B la constante de Boltzmann, T la température en Kelvin, et $\hbar$ la constante de Planck réduite. L'algorithme de Zénon est censé contrecarrer cette décohérence naturelle en forçant l'état avant que l'environnement ne le fasse de manière aléatoire.

1. Hamiltonien : Opérateur mathématique en mécanique quantique correspondant à la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un système, dictant son évolution temporelle.

2. Matrice densité réduite : Outil mathématique probabiliste permettant de décrire l'état statistique d'un sous-système quantique ouvert interagissant avec un environnement massif, contrairement à une simple fonction d'onde.

3. Décohérence : Processus par lequel un système quantique perd ses propriétés d'interférence et de superposition en raison de son interaction avec son environnement, se comportant alors de manière statistique classique.

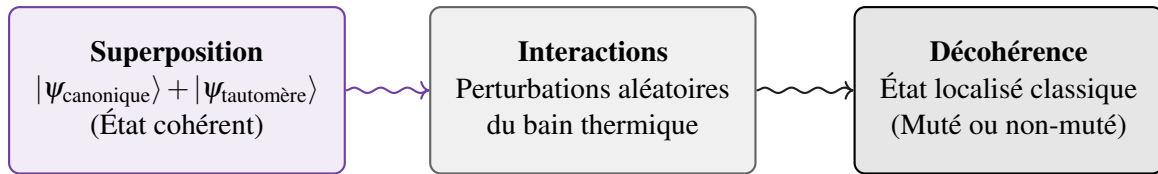


FIGURE 6 – *Processus de décohérence quantique*. Sous l’effet des interactions thermiques aléatoires décrites par l’équation de Caldeira-Leggett, la superposition quantique initiale du proton (gauche) se réduit rapidement à un état défini et classique (droite).

6. LE PARADOXE DE LA MESURE ET LA LIMITE STRUCTURELLE

L’implémentation physique de l’opérateur $P_{\text{canonique}}$ nécessite de localiser la particule avec une résolution spatiale strictement inférieure à la distance séparant les deux puits de potentiel. L’implémentation de cette mesure projective soulève un paradoxe énergétique majeur, illustré à la Figure 7. La longueur d’une liaison hydrogène dans l’ADN étant d’environ 0,3 nm, la sonde d’observation (par exemple, un photon) doit posséder une longueur d’onde maximale de 0,1 nm pour éviter l’incertitude spatiale.

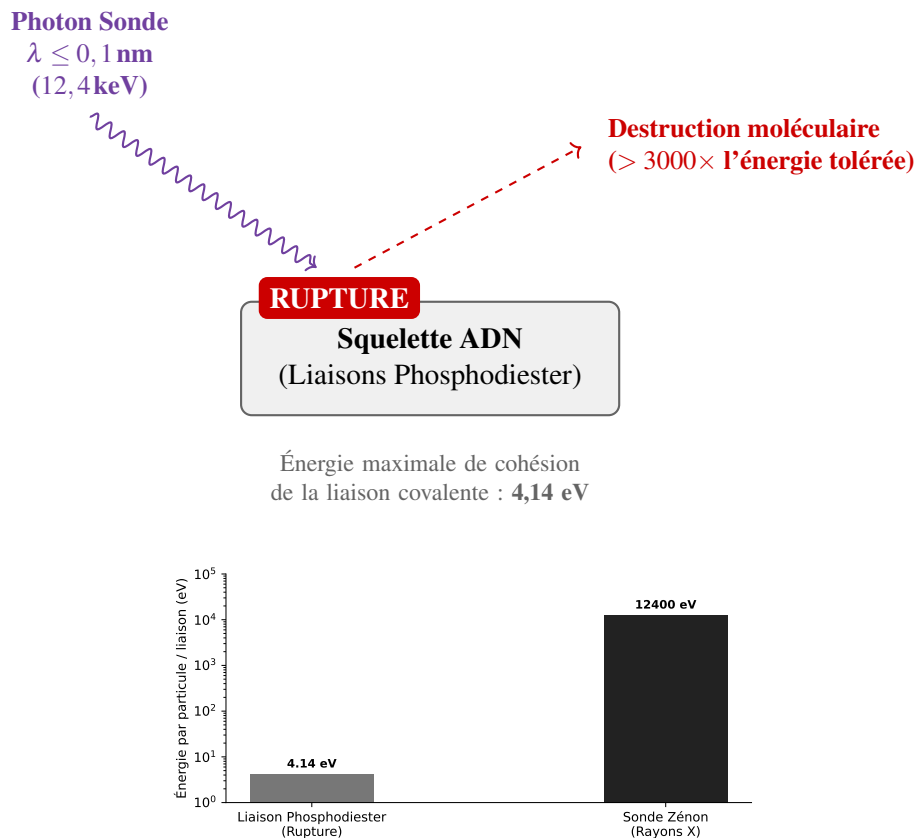


FIGURE 7 – *Caractère destructeur de la mesure localisée et comparaison des échelles d’énergie*. Pour observer un proton avec une résolution sub-nanométrique, l’énergie du photon sonde (rayons X durs) pulvérise instantanément le seuil de rupture des liaisons phosphodiester du squelette de l’ADN, détruisant la macromolécule.

L’énergie associée à ce photon se calcule via l’équation de Planck-Einstein, où l’énergie est inversement

proportionnelle à la longueur d'onde :

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Dans cette formulation, E désigne l'énergie du photon, h la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c la vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) et λ la longueur d'onde de la sonde. En appliquant la valeur de $0,1 \text{ nm}$, l'énergie obtenue est d'environ $1,98 \times 10^{-15} \text{ J}$. Convertie en électronvolts, cette énergie atteint environ $12,4 \text{ keV}$, ce qui place ce rayonnement dans le spectre des rayons X durs.

Cependant, le squelette structurel de la molécule d'ADN est maintenu par des liaisons covalentes phosphodiester. L'énergie de dissociation de ces liaisons s'élève à 400 kJ/mol , ce qui équivaut à $4,14 \text{ eV}$ par liaison individuelle. L'énergie du photon de mesure requis est donc approximativement trois mille fois supérieure à l'énergie de cohésion de la molécule elle-même.

À l'heure actuelle, nous ne disposons d'aucune technologie capable d'opérer une mesure projective à cette échelle spatiale sans transférer une quantité d'énergie destructrice. D'autres régimes d'observation, tels que le couplage du système à une cavité optique résonante (Électrodynamique Quantique en Cavité), ont été proposés dans d'autres domaines [15]. Toutefois, à température ambiante, le taux de décohérence thermique de l'ADN excède très largement la constante de couplage réalisable entre un proton et le mode de la cavité, rendant la stabilisation de Zénon inopérante sans vaporiser l'échantillon. La tentative d'observation continue pour induire l'effet Zénon avec nos capteurs actuels entraînerait une radiolyse¹ et la dégradation immédiate du support de stockage.

7. LE DÉFI THERMODYNAMIQUE : PRINCIPE DE LANDAUER

Même en postulant le développement futur hypothétique d'une méthode de mesure non destructrice, le système devrait faire face à une contrainte thermodynamique majeure. Le principe de Landauer², formulé en 1961 [8] et vérifié expérimentalement par Bérut et al. en 2012 [7], établit que tout traitement irréversible de l'information, y compris la mesure et l'effacement successif de l'état d'un qubit, dissipe une quantité minimale de chaleur dans l'environnement.

L'énergie dissipée par une seule opération logique irréversible s'exprime par la relation :

$$E_L = k_B T \ln(2)$$

1. Radiolyse : Décomposition de molécules chimiques provoquée par l'impact de rayonnements ionisants de très haute énergie, entraînant la destruction du matériel génétique.

2. Principe de Landauer : Théorème fondamental stipulant que l'effacement irréversible d'un bit d'information dégage une quantité irréductible de chaleur, créant un pont direct entre thermodynamique et théorie de l'information.

Où E_L est l'énergie de Landauer, k_B la constante de Boltzmann et T la température absolue du système. À température ambiante ($T = 300\text{ K}$), l'énergie dissipée par mesure est d'environ $2,87 \times 10^{-21}$ Joules.

Pour un volume de stockage modéré de 1 Pétaoctet, représentant environ 5×10^{15} paires de bases (noté N), l'algorithme de Zénon exige que chaque base soit mesurée toutes les picosecondes ($\tau = 10^{-12}\text{ s}$) pour devancer le temps de transfert par effet tunnel. La puissance électrique P thermodynamique minimale générée sous forme de chaleur serait :

$$P = \frac{N \times E_L}{\tau} \longrightarrow P = \frac{5 \times 10^{15} \times 2,87 \times 10^{-21}}{10^{-12}} \approx 14,35 \text{ Mégawatts}$$

Il convient de noter que relâcher cette contrainte en espaçant les mesures (augmentation de τ) ou en utilisant un échantillonnage probabiliste réduirait proportionnellement la dissipation thermique, mais annulerait mathématiquement l'effet Zénon. Le succès de l'algorithme repose sur une fréquence d'observation stricte ; toute mesure manquée permet à la fonction d'onde d'évoluer vers la mutation.

L'avantage écologique majeur de l'archivage sur ADN, justifiant les investissements actuels, réside dans son besoin énergétique nul une fois la donnée stockée. La dissipation continue de plus de 14 Mégawatts d'énergie sous forme de chaleur dans les enceintes de stockage représente une limite thermodynamique fondamentale (Figure 8). Elle implique des contraintes thermiques et énergétiques structurellement incompatibles avec l'architecture d'un support organique dense.

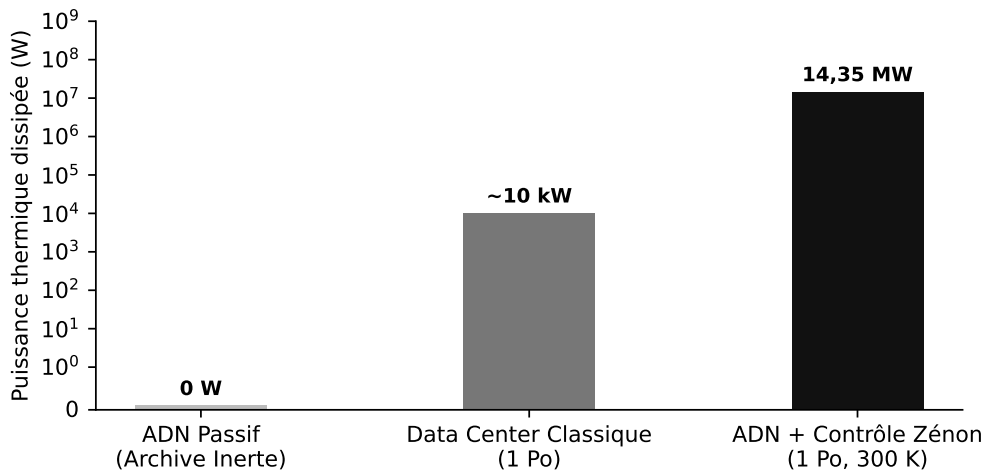


FIGURE 8 – *Comparaison de la dissipation thermique théorique générée par les mesures selon le principe de Landauer.*

8. FORMULATION DU THÉORÈME DE *NO-GO* ADN-ZÉNON

À partir de l'ensemble des dérivations obtenues aux sections précédentes, nous pouvons rassembler ces résultats au sein d'une formalisation unifiée. La Figure 9 cartographie l'ensemble des verrous physiques insurmontables mis en évidence, convergeant vers l'énoncé de notre théorème d'impossibilité.

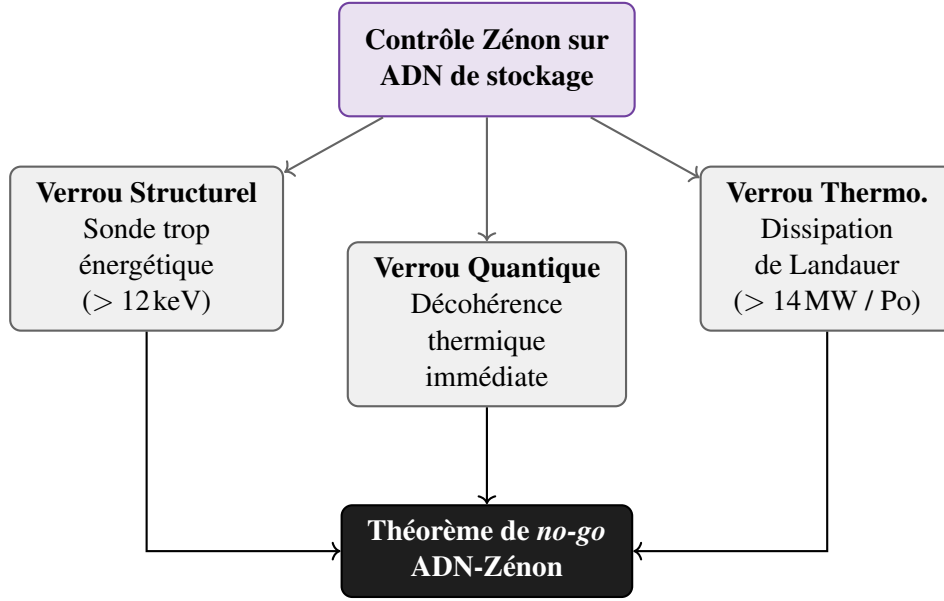


FIGURE 9 – Synthèse des trois verrous physiques fondamentaux. La convergence des limitations structurales, quantiques et thermodynamiques interdit toute viabilité technologique au contrôle Zénon pour le stockage ADN, fondant ainsi le théorème d'impossibilité (*no-go*).

Théorème 1 (Théorème de non-viabilité énergétique du contrôle Zénon d'ADN de stockage, ou théorème de *no-go* ADN-Zénon). Soit un ensemble de polymères d'ADN servant de support de stockage d'information numérique, opérant sous les hypothèses suivantes :

- H1. Résolution spatiale :** Pour prévenir la tautomérisation protonique par effet tunnel, la position du proton dans la liaison hydrogène est mesurée avec une incertitude spatiale $\Delta x \leq 0,1 \text{ nm}$.
- H2. Intégrité de structure :** La cohésion de la macromolécule repose sur des liaisons phosphodiester dont l'énergie de rupture individuelle est $E_{\text{liaison}} \approx 4,14 \text{ eV}$.
- H3. Thermodynamique de Landauer :** Chaque acte de mesure projective irréversible dissipe au minimum $E_L = k_B T \ln 2$ sous forme de chaleur.
- H4. Cadence Zénon :** Les mesures sont répétées à un intervalle temporel $\Delta t \leq \tau_{\text{tunnel}} \approx 10^{-12} \text{ s}$ sur un ensemble de N paires de bases.

Alors, tout protocole de contrôle quantique actif répondant à H1-H4 induit inévitablement :

- i. Une énergie de sonde individuelle $E_{\text{sonde}} = \frac{hc}{\lambda} \approx 12,4 \text{ keV} \gg E_{\text{liaison}}$, causant la radiolyse instantanée du polymère.
- ii. Une puissance thermique minimale dissipée $P = \frac{N k_B T \ln 2}{\tau_{\text{tunnel}}} \approx 14,35 \text{ MW}$ pour $N = 5 \times 10^{15}$ bases (1 Po à 300 K), annulant le bilan énergétique passif du support.

Encadré 1 - Interprétation pour l'ingénieur.

En pratique, cela signifie que si l'on tente de surveiller chaque proton de manière suffisamment fréquente et précise pour bloquer les mutations induites par effet tunnel, (i) le transfert d'énergie du capteur (type rayons X) détruit mécaniquement l'ADN, et (ii) la surveillance permanente exige une alimentation électrique ininterrompue d'environ 14,35 MW pour 1 Pétaoctet, ce qui annule totalement l'objectif d'un stockage ADN à très basse consommation [7, 8].

- **H1 (Résolution)** : Pour localiser le proton, la longueur d'onde de la sonde d'observation doit être strictement inférieure à l'amplitude de son déplacement spatial.
- **H2 (Intégrité)** : L'intégrité structurelle de la macromolécule est rompue si l'énergie transférée par la sonde excède l'énergie de liaison covalente de l'ADN (4,14 eV).
- **H3 (Landauer)** : Toute opération de mesure et de réinitialisation d'un capteur engendre une dissipation thermique inéluctable imposée par la thermodynamique.
- **H4 (Cadence)** : La fréquence d'observation doit excéder la dynamique naturelle du proton (à l'échelle de la picoseconde) pour figer son état.

9. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET VARIATION DES RÉGIMES DE PARAMÈTRES

Afin d'évaluer la robustesse de notre théorème de *no-go* ADN-Zénon face à d'éventuelles variations d'architecture ou de conditions d'opération, nous menons une analyse de sensibilité systématique en faisant varier la capacité de stockage N , la température de fonctionnement T , ainsi que le régime de mesure.

9.1 Sensibilité à la Capacité du Système (N)

Si l'on réduit la capacité du pool d'ADN de 1 Po à des volumes plus modestes, la puissance thermique dissipée régie par le principe de Landauer évolue de manière strictement linéaire selon la capacité N :

- Pour 1 Mo ($N \approx 5 \times 10^9$ bases) : $P \approx 14,35$ W.
- Pour 1 Go ($N \approx 5 \times 10^{12}$ bases) : $P \approx 14,35$ kW.
- Pour 1 Po ($N \approx 5 \times 10^{15}$ bases) : $P \approx 14,35$ MW.
- Pour 1 Eo ($N \approx 5 \times 10^{18}$ bases) : $P \approx 14,35$ GW.

Bien que pour un seul Mégaoctet la puissance de 14,35 W semble techniquement gérable sur le plan macroscopique, il faut rappeler que cette chaleur est dissipée au sein d'un volume moléculaire microscopique d'environ 10^{-6} mm^3 . La densité de puissance thermique volumique dépasse alors 10^7 W/cm^3 , ce qui provoquerait une élévation locale de température destructrice pour la matière organique.

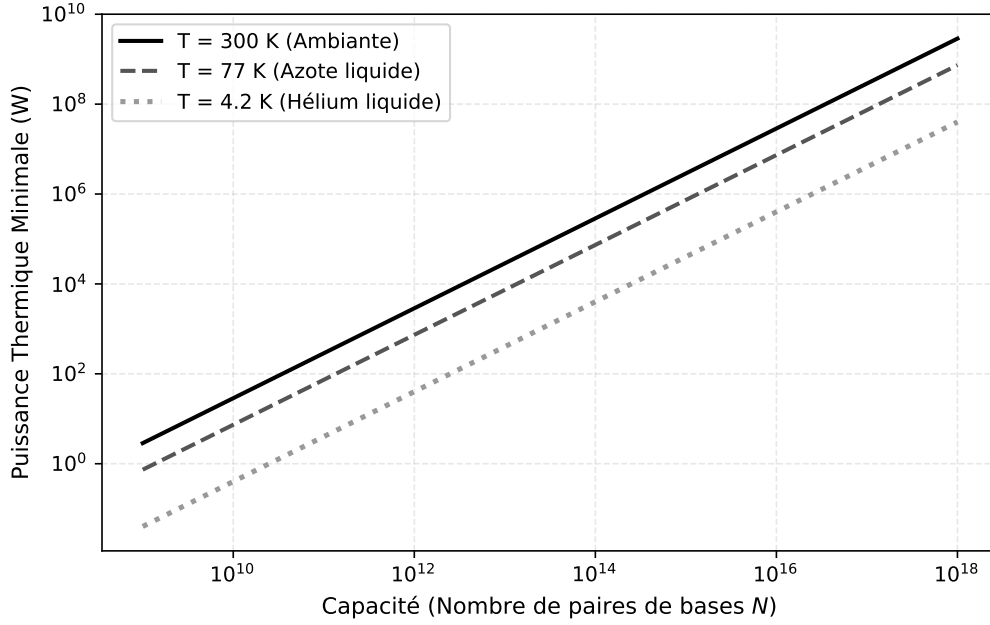


FIGURE 10 – Évolution de la puissance thermique dissipée (Landauer) en fonction de la capacité de stockage N et de la température T . Même pour des volumes modestes, la densité d'énergie locale reste un verrou majeur.

9.2 Sensibilité à la Température (T)

L'abaissement de la température diminue directement l'énergie de Landauer par mesure ($E_L \propto T$) :

- À température ambiante ($T = 300\text{ K}$) : $E_L = 2,87 \times 10^{-21}\text{ J} \Rightarrow P = 14,35\text{ MW}$ pour 1 Po.
- À la température de l'azote liquide ($T = 77\text{ K}$) : $E_L = 0,737 \times 10^{-21}\text{ J} \Rightarrow P = 3,68\text{ MW}$ pour 1 Po.
- À la température de l'hélium liquide ($T = 4,2\text{ K}$) : $E_L = 0,040 \times 10^{-21}\text{ J} \Rightarrow P = 0,20\text{ MW}$ (200kW) pour 1 Po.

Bien que la cryogénie réduise la puissance thermique de Landauer d'un facteur 70 à 4,2 K, l'extraction de ces 200 kW de chaleur à des températures proches du zéro absolu nécessite une puissance électrique de réfrigération externe (selon le rendement de Carnot) supérieure à plusieurs dizaines de Mégawatts. De plus, la baisse de température ne réduit en rien l'énergie du photon de localisation (12,4 keV), rendant la rupture des liaisons phosphodiester tout aussi inévitable.

9.3 Sensibilité à la Résolution et à la Cadence ($\Delta x, \Delta t$)

Sensibilité à la résolution spatiale (Δx) : Même si l'on relâche Δx à 0,2 nm (une mesure moins précise), l'énergie du photon requise serait $E = hc/\lambda \approx 6,2\text{ keV}$. Le rapport $E_{\text{sonde}}/E_{\text{liaison}}$ reste supérieur à $1500 \gg 1$, donc la destruction structurelle du polymère persiste implacablement [1, 2].

Sensibilité à la cadence de mesure (Δt) : Même en réduisant la cadence de mesure d'un ordre de grandeur (par exemple $\Delta t = 10\tau$), la puissance thermique chuterait à 1,4MW, ce qui reste ingérable à l'échelle d'une archive. De plus, à cette cadence, le comportement quantique bascule : la probabilité de survie de l'état canonique, qui décroît de manière quadratique dans le régime Zénon ($1 - (\Delta t/\tau_Z)^2$), bascule vers une décroissance exponentielle linéaire classique ($e^{-\Gamma t}$). Le gel quantique est alors rompu et la méthode devient inopérante [5, 6].

9.4 Synthèse de la robustesse du théorème d'impossibilité

En résumé, l'analyse de sensibilité démontre la robustesse de ce théorème de *no-go* ADN-Zénon. Aucune variation des paramètres opérationnels ne permet de restaurer la viabilité d'un tel système de contrôle quantique :

- **Réduire la capacité (N)** abaisse la puissance globale, mais maintient une densité d'énergie thermique locale destructrice ($> 10^7 \text{ W/cm}^3$).
- **Abaisser la température (T)** réduit le coût thermodynamique unitaire, mais ajoute un coût de réfrigération macroscopique disproportionné, tout en laissant intacte la destruction moléculaire par le photon de mesure.
- **Dégrader la résolution spatiale (Δx)** requiert toujours une énergie de sonde (rayons X) d'un ordre de grandeur bien supérieur à l'énergie de liaison covalente.
- **Espacer la cadence de mesure (Δt)** dissipe moins de chaleur, mais détruit purement et simplement le régime Zénon, permettant à l'effet tunnel et aux mutations de s'opérer librement.

L'impossibilité n'est donc pas un artéfact découlant de paramètres extrêmes, mais bien une limite physique inhérente au paradigme même du contrôle quantique appliqué à un polymère d'information dense.

10. INADÉQUATION DES MÉTHODES D'OBSERVATION BIOLOGIQUES

Face à la destruction du support par observation directe, l'utilisation de méthodes analytiques indirectes issues de la biologie quantique pourrait être envisagée. L'ingénierie pourrait-elle se tourner vers les outils de pointe utilisés en laboratoire pour observer et figer ces phénomènes ? Une analyse détaillée démontre que nos technologies d'observation rendent ces méthodes inopérantes pour le stockage de données.

10.1 L'Effet Isotopique Cinétique (Substitution par le Deutérium)

En biophysique de recherche, on ralentit expérimentalement l'effet tunnel en remplaçant l'hydrogène de l'ADN par du deutérium (un isotope lourd comportant un neutron supplémentaire). La probabilité de

transmission tunnel T à travers une barrière est définie par l'approximation WKB¹ (Wentzel-Kramers-Brillouin) :

$$T \approx \exp\left(-\frac{2a}{\hbar}\sqrt{2m(V-E)}\right)$$

Dans cette équation, a représente la largeur de la barrière de potentiel, m la masse de la particule franchissant la barrière, et $(V-E)$ le déficit d'énergie (hauteur de la barrière relative à l'énergie de la particule). En doublant la masse m de la particule de 1 u (hydrogène) à 2 u (deutérium), la probabilité de saut quantique T s'effondre de façon exponentielle. L'état quantique est ainsi stabilisé thermodynamiquement, sans nécessiter d'observation active.

Cependant, nos technologies de lecture actuelles (le séquençage par synthèse) reposent sur des enzymes polymérases dont la cinétique enzymatique est strictement calibrée sur la dynamique et le poids de l'hydrogène. L'effet isotopique cinétique secondaire engendré par les liaisons deutérées ralentit considérablement la séparation des brins par les hélicases, bloquant les processus de PCR et rendant la lecture des données informatiques aujourd'hui inexploitable avec nos séquenceurs standards.

10.2 Spectroscopie Ultrarapide (Lasers Femtosecondes)

L'observation d'un état quantique ultra-bref avant sa décohérence nécessite des impulsions laser de l'ordre de la femtoseconde (10^{-15} s). Pour maintenir un système figé par l'effet Zénon, il faudrait bombarder les liaisons hydrogène en continu à cette cadence stroboscopique. L'intensité optique I délivrée par le faisceau se calcule en fonction de l'énergie E , de la durée de l'impulsion Δt et de la surface focale S :

$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S}$$

Même pour des énergies photoniques minimales, la division par un temps d'impulsion Δt de 10^{-15} s génère des intensités colossales dépassant aisément le seuil d'ionisation multiphotonique² (estimé à environ 10^{13} W/cm² pour les molécules organiques). À cette intensité, nos instruments optiques ne feraient pas qu'observer le substrat ; ils le transformeraient instantanément en plasma par arrachement non linéaire des électrons, incinérant l'information ciblée.

1. Approximation WKB : Méthode d'approximation semi-classique de la mécanique quantique, très souvent utilisée pour évaluer la décroissance exponentielle de la probabilité de franchissement d'une barrière de potentiel.

2. Ionisation multiphotonique : Processus optique non linéaire par lequel un atome absorbe simultanément plusieurs photons pour libérer un électron, générant la formation d'un plasma destructeur.

10.3 Résonance Paramagnétique Électronique (RPE)

La Résonance Paramagnétique Électronique est l’outil standard pour observer les propriétés quantiques de l’ADN en laboratoire. Elle permet de détecter les transitions d’énergie via la séparation des états de spin dans un champ magnétique, un phénomène décrit par l’effet Zeeman¹ :

$$E = g\mu_B B m_s$$

Dans cette formule, g est le facteur de Landé, μ_B le magnéton de Bohr, B l’intensité du champ magnétique appliqué, et m_s le nombre quantique de spin. Le problème physique pour l’ingénierie du stockage réside précisément dans ce terme m_s . La RPE requiert un moment magnétique non nul, donc des électrons célibataires (non appariés). Or, l’ADN inerte synthétisé pour le stockage informatique est une molécule fondamentalement diamagnétique² ; l’ensemble de ses électrons de valence sont appariés, annulant le signal. Pour induire un signal observable, il faudrait générer chimiquement des radicaux libres. En biochimie, l’ajout délibéré de radicaux libres constitue un stress oxydatif sévère, provoquant la rupture des brins phosphodiester. Tenter d’observer l’ADN par RPE avec nos méthodes d’induction actuelles corromprait donc le code binaire encodé.

10.4 La Chimie Quantique *in silico* (Théorie de la Fonctionnelle de la Densité - DFT)

Une alternative algorithmique consisterait à appliquer la projection de Zénon virtuellement, via un jumeau numérique simulant la dynamique en temps réel grâce à la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité (DFT)³. Bien que des méthodes approchées telles que les potentiels interatomiques par apprentissage automatique (MLIPs) [16] aient permis d’accélérer les calculs, l’effondrement exact d’une fonction d’onde requiert une résolution *ab initio* stricte. Le coût computationnel de la DFT traditionnelle croît de façon cubique par rapport au nombre d’électrons N :

$$\text{Temps de calcul} \propto \mathcal{O}(N^3)$$

Un modeste Mégaoctet de données stocké dans l’ADN représente environ $2,4 \times 10^9$ électrons de valence. L’effort de calcul proportionnel devient $(2,4 \times 10^9)^3 \approx 1,38 \times 10^{28}$ opérations mathématiques. Nos supercalculateurs exascales actuels nécessiteraient des millénaires pour calculer l’état quantique exact d’un seul mégaoctet figé à un instant t . Simuler l’effet Zénon en continu dépasse totalement nos capacités de

1. Effet Zeeman : Phénomène décrivant la séparation des niveaux d’énergie d’un système quantique, tel qu’un atome ou une molécule, en raison de son exposition à un champ magnétique externe.

2. Diamagnétique : Propriété d’un matériau sans moment magnétique permanent, dont tous les électrons orbitaux sont appariés par paires de spins opposés.

3. DFT : Méthode quantique puissante permettant d’étudier la structure électronique d’un système à plusieurs corps en utilisant la densité spatiale des électrons plutôt que les fonctions d’onde complexes.

calcul matériel.

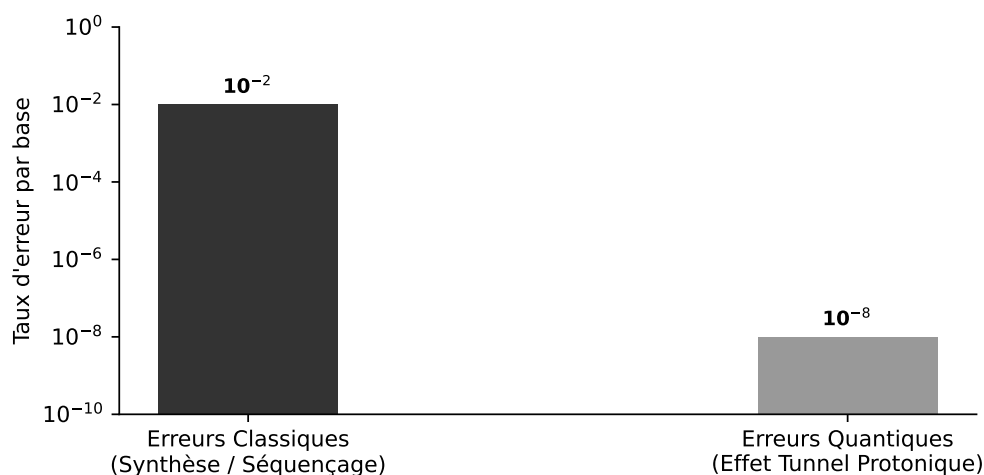


FIGURE 11 – Fréquence d'apparition des erreurs classiques comparées aux erreurs d'origine quantique. Un contrôle quantique ne ciblerait qu'une fraction marginale des altérations globales.

11. PROPOSITIONS ET FEUILLE DE ROUTE STRATÉGIQUE

L'application directe de l'effet Zénon quantique comme système matériel de correction d'erreurs pour l'ADN de stockage constitue un défi physique que nos technologies actuelles ne permettent pas de relever de façon pratique. La complexité de l'ADN en tant que support macromoléculaire dense, soumis au bruit thermique continu, nécessite d'envisager des solutions alternatives adaptées à notre niveau technologique. Afin de guider les investissements de R&D, le Tableau 1 synthétise les performances comparées des différentes approches de préservation et de correction.

TABLE 1 – Matrice comparative quantitative des stratégies de préservation et de correction d'erreurs dans le stockage sur ADN.

Méthode / Stratégie	Coût Énergétique (W / bit / an)	Taux d'Erreur Cible	Densité Volumique	Horizon Temporel	Faisabilité Pratique
Contrôle Zénon Actif (QZE)	$\sim 10^{-9}$ W	10^{-8} (Quantique)	Nulle (Plasma)	Spéculatif	Nulle (Physique)
Cryogénie Passive (77 K) [10]	$\sim 10^{-14}$ W	$< 10^{-5}$ (Global)	Conservation	Immédiat	Élevée
Ingénierie XNA / Polymères [9]	0 W (Inerte)	$< 10^{-6}$ (Global)	Équivalente	5-10 ans	Moyenne
Codes Correcteurs (LDPC) [11]	0 W (Passif)	0 (Restitué)	-15% à -30%	Immédiat	Maximale
IA Prédictive (Deep Learning) [12]	0 W (In silico)	Optimisé	Maximum	2-5 ans	Élevée

Afin de pallier les risques de mutations quantiques et biochimiques, nous structurons nos propositions selon leur faisabilité, leur coût énergétique et leur horizon temporel.

11.0.1 Solutions à court terme (Maturité technologique élevée)

Puisque l'intervention physique au niveau quantique du proton est actuellement hors de portée de nos instruments, la solution la plus robuste et immédiate réside dans la couche logicielle et thermique.

- **Correction Algorithmique Prédictive par Intelligence Artificielle** : La théorie de l'information développée par Claude Shannon [11] fournit les fondations mathématiques pour gérer l'incertitude dans tout canal de communication. Plus récemment, les réseaux de neurones profonds (Deep Learning) ont commencé à être appliqués à la modélisation des erreurs de séquençage et de synthèse [12]. Plutôt que de corriger le proton physiquement, il devient envisageable d'entraîner des modèles d'intelligence artificielle à identifier les « hotspots » quantiques : les séquences d'ADN spécifiques où le paysage énergétique favorise les tautomérisations transitoires. L'algorithme d'encodage de données pourrait alors allouer un taux de redondance plus élevé (via des codes LDPC¹) spécifiquement autour de ces zones de vulnérabilité identifiées *in silico*. Cette méthode est implémentable immédiatement via nos architectures logicielles existantes, pour un coût énergétique d'encodage négligeable.
- **Préservation Thermodynamique Passive (Cryogénie)** : Pour limiter la dynamique interne de la molécule sans utiliser de sondes électromagnétiques destructrices, un stockage à très basse température reste une solution éprouvée. La littérature sur la préservation de l'ADN, telle que les travaux d'encapsulation siliceuse de Grass et al. [10] ou les récents essais d'archivage cryogénique, montre que la diminution thermique supprime considérablement l'agitation moléculaire et la réactivité chimique. La suppression quasi-totale des phonons² ralentit de façon majeure les processus tautomériques. Bien que cela n'élimine pas entièrement l'effet tunnel (qui est par nature indépendant de la température), cela empêche les réarrangements structuraux subséquents qui fixent de façon permanente la mutation. Cette proposition présente une très forte faisabilité, au prix d'un coût énergétique de maintenance modéré pour les infrastructures de refroidissement.

11.0.2 Solutions à moyen terme (Recherche translationnelle)

Si le contrôle algorithmique ne suffit pas, une solution structurelle au niveau du polymère lui-même peut être envisagée d'ici une décennie, éliminant le besoin de contrôle dynamique.

- **Ingénierie Moléculaire et Xéno-Acides Nucléiques (XNA)** : L'utilisation d'acides nucléiques artificiels (XNA), qui introduisent des modifications chimiques par rapport à l'ADN naturel (comme le L-DNA ou des sucres modifiés), permet de créer des polymères génétiques extrêmement robustes. Les travaux pionniers de Pinheiro et al. [9] ont démontré la capacité des XNA à conserver l'hérédité tout en offrant une résilience structurelle largement supérieure aux nucléases

1. Low-Density Parity-Check : catégorie de codes correcteurs d'erreurs linéaires extrêmement performants, utilisant des graphes bipartites, initialement conçus pour les télécommunications bruitées.

2. Phonons : Quanta d'énergie d'agitation ou de vibration (semblables à des ondes acoustiques) circulant au sein de la structure atomique du polymère, responsables de la transmission de la chaleur.

et à la dégradation chimique. En concevant des nucléotides artificiels, il serait possible d'altérer la morphologie des puits de potentiel des liaisons hydrogène. En créant un profil énergétique fortement asymétrique dès la synthèse chimique, la barrière de potentiel deviendrait trop haute ou trop large pour que l'effet tunnel des protons se produise de manière significative. Cette solution passive stabiliserait l'information quantique de manière inhérente, bien qu'elle nécessite encore des avancées majeures dans la vitesse et le coût de synthèse et de séquençage de ces molécules XNA.

11.0.3 Solutions à long terme (Spéculatives)

Le maintien d'un contrôle actif direct sur l'état quantique des données biologiques requiert des sauts conceptuels majeurs, dont l'horizon d'application reste spéculatif.

- **Mesures Quantiques Faibles (Weak Measurements)** : Bien que la mesure projective de l'effet Zénon classique soit trop énergétique pour nos senseurs actuels, la recherche fondamentale pourrait s'orienter vers les mesures quantiques faibles. Ce concept théorique, formalisé par Aharonov et al. [17], repose sur une intrication¹ extrêmement ténue entre le système observé et un système auxiliaire. Cette approche permet de recueillir de l'information partielle en continu sans provoquer d'effondrement brutal de la fonction d'onde, et surtout sans apporter l'énergie photonique destructrice des rayons X. Si nos technologies ne maîtrisent actuellement ces techniques que sur des systèmes optiques ou supraconducteurs simples et isolés [15], l'évolution lointaine de nos capacités en nanophotonique moléculaire pourrait offrir une forme de rétroaction quantique non invasive applicable à l'ingénierie génétique.

12. CONCLUSION ET AGENDA DE RECHERCHE

L'application de l'effet Zénon quantique comme système matériel de correction d'erreurs pour l'ADN de stockage constitue un paradoxe physique dont la résolution échappe à nos technologies contemporaines. Nous pouvons synthétiser nos conclusions en trois points clés :

1. **Incompatibilité structurelle** : L'énergie photonique requise pour localiser un proton à l'échelle angström (12,4 keV) excède d'un facteur 3000 l'énergie de dissociation covalente du squelette phosphodiester (4,14 eV), causant la destruction immédiate de la mémoire moléculaire par radiolyse.
2. **Verrou thermodynamique** : La mesure projective continue imposée par la cadence de Zénon dissipe, en vertu du principe de Landauer, une puissance thermique minimale de 14,35 MW pour une archive d'un Pétaoctet, invalidant totalement la sobriété énergétique du stockage biologique.

1. Intrication : Phénomène quantique stupéfiant dans lequel deux particules forment un système lié indivisible, où l'état de l'une détermine instantanément l'état de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

3. **Dissymétrie des budgets d'erreurs** : L'effet tunnel protonique génère un taux d'erreur de 10^{-8} par base, marginal par rapport au bruit de synthèse biochimique classique (10^{-2} par base).

Cette situation souligne une frontière essentielle entre l'informatique quantique théorique et l'ingénierie moléculaire appliquée. L'effet Zénon est un concept élégant et exploitable par nos équipements pour des systèmes isolés et cryogéniques (comme les ordinateurs quantiques), où l'environnement est hautement contrôlé. À l'inverse, l'ADN est un support macromoléculaire dense, dont la force de rétention de l'information réside justement dans l'absence de besoin de contrôle actif. Tenter de lui imposer un contrôle quantique continu annulerait l'intégralité de ses avantages inhérents en matière de densité volumique et de sobriété énergétique.

Par conséquent, l'agenda de recherche prioritaire pour la communauté du stockage sur ADN doit s'orienter vers les recommandations suivantes :

- **Court terme** : Privilégier la combinaison du stockage cryogénique [10] et des codes correcteurs d'erreurs logiques (LDPC / Fountain) [11], qui garantissent une restauration parfaite des données tout en préservant la densité volumique de l'ADN.
- **Moyen terme** : Investir dans la modélisation prédictive par intelligence artificielle [12] pour cartographier les *hotspots* de tautomérisation, ainsi que dans la chimie des XNA [9] pour réduire le besoin d'un contrôle dynamique par une immunité structurelle.
- **Long terme** : Reléguer les approches de contrôle quantique actif (comme les mesures faibles [17]) à la recherche fondamentale spéculative, sans horizon industriel prévisible pour l'archivage de données.

L'intégration de codes de correction d'erreurs logiques avancés, couplée à une ingénierie moléculaire passive et au stockage inerte [10], demeure aujourd'hui l'approche la plus rationnelle, sécurisée et scientifiquement cohérente.

RÉFÉRENCES

1. Church, G. M., Gao, Y., & Kosuri, S. (2012). Next-generation digital information storage in DNA. *Science*, 337(6102), 1628. <https://doi.org/10.1126/science.1226355>
2. Goldman, N., et al. (2013). Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA. *Nature*, 494(7435), 77-80. <https://doi.org/10.1038/nature11875>
3. Löwdin, P.-O. (1965). Quantum genetics and the aperiodic solid. *Advances in Quantum Chemistry*, 2, 213-360. [https://doi.org/10.1016/S0065-3276\(08\)60076-3](https://doi.org/10.1016/S0065-3276(08)60076-3)
4. Slocombe, L., Al-Khalili, J. S., & Sacchi, M. (2022). An Open Quantum Systems approach to proton tunnelling in DNA. *Communications Physics*, 5(1), 109. <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00881-8>
5. Misra, B., & Sudarshan, E. C. G. (1977). The Zeno's paradox in quantum theory. *Journal of Mathematical Physics*, 18(4), 756-763. <https://doi.org/10.1063/1.523304>
6. Facchi, P., & Pascazio, S. (2008). Quantum Zeno dynamics : mathematical and physical aspects. *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*, 41(49), 493001. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/41/49/493001>
7. Bérut, A., et al. (2012). Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics. *Nature*, 483(7388), 187-189. <https://doi.org/10.1038/nature10872>
8. Landauer, R. (1961). Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process. *IBM Journal of Research and Development*, 5(3), 183-191. <https://doi.org/10.1147/rd.53.0183>
9. Pinheiro, V. B., et al. (2012). Synthetic genetic polymers capable of heredity and evolution. *Science*, 336(6079), 341-344. <https://doi.org/10.1126/science.1217622>
10. Grass, R. N., et al. (2015). Robust chemical preservation of digital information on DNA in silica with error-correcting codes. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(8), 2552-2555. <https://doi.org/10.1002/anie.201411378>
11. Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
12. Bar-Lev, D., Orr, I., Sabary, O., Etzion, T., & Yaakobi, E. (2025). Scalable and robust DNA-based storage via coding theory and deep learning. *Nature Machine Intelligence*, 7(4), 639-649. <https://doi.org/10.1038/s42256-025-01003-z>
13. Heckel, R., Mikutis, G., & Grass, R. N. (2019). A Characterization of the DNA Data Storage Channel. *Scientific Reports*, 9(1), 9663. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45832-6>
14. Organick, L., et al. (2018). Random access in large-scale DNA data storage. *Nature Biotechnology*, 36(3), 242-248. <https://doi.org/10.1038/nbt.4079>
15. Blais, A., et al. (2021). Circuit quantum electrodynamics. *Reviews of Modern Physics*, 93(2), 025005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025005>
16. Behler, J. (2016). Perspective : Machine learning potentials for atomistic simulations. *The Journal of Chemical Physics*, 145(17), 170901. <https://doi.org/10.1063/1.4966192>

17. Aharonov, Y., Albert, D. Z., & Vaidman, L. (1988). How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100. *Physical Review Letters*, 60(14), 1351. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.1351>

Lectures complémentaires (*non citées directement dans le texte, mais pertinentes pour le contexte*)

- Facchi, P., & Pascazio, S. (2002). Quantum Zeno subspaces. *Physical Review Letters*, 89(8), 080401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.080401>
- Vinjanampathy, S., & Anders, J. (2016). Quantum thermodynamics. *Contemporary Physics*, 57(4), 545-579. <https://doi.org/10.1080/00107514.2016.1201896>