

Et si demain, les forces armées pouvaient transmettre un ordre de mission entre plusieurs postes de commandements sans consommer d'énergie, à température ambiante, dans une infrastructure d'import tactique ultra-légère, discrète et résiliente aux cyberattaques ? C'est en résumé la promesse de l'informatique moléculaire, c'est-à-dire du stockage de données sur ADN.

Face à l'explosion du volume de données notamment liée aux usages généralisés de l'intelligence artificielle (IA), les acteurs de la sphère Défense sont contraints de trouver des solutions de rupture pour conserver des capacités de stockage à haute densité, sécurisées et faiblement consommatrices de ressources. Le stockage de données sur ADN constitue un domaine émergent allant dans le sens de l'autonomie stratégique des forces armées.

Biomemory, start up nationale de la Deeptech issue de Sorbonne Université et du CNRS (centre national de la recherche scientifique), est l'acteur pionnier mondial qui structure l'émergence d'une filière professionnelle en informatique moléculaire. La technologie Biomemory constitue une solution d'intérêt pour le secteur de la défense en offrant une alternative durable et souveraine aux supports de stockage traditionnels.

La société vise ainsi pour la fin de la décennie une capacité de stockage ultra capacitaire éternelle avec 1 octaet de données dans une infrastructure de quelques dizaines de centimètres. La technologie pourrait être envisagée aussi bien dans des datacenters et des infrastructures enterrées que sur des théâtres d'opération extérieure grâce aux cartes ADN. La résistance de l'ADN aux conditions extrêmes (température, humidité, menace électromagnétique) et son potentiel furtif (absence de signal) rendent les cartes ADN adaptées aux contextes militaires exigeants.

Les défis de la soutenabilité du stockage de la donnée

Les défis liés à la maîtrise des données sont nombreux au sein des Armées, dont l'objectif est la supériorité opérationnelle. Le secteur de la défense a renforcé ses investissements ces dernières années dans l'intelligence artificielle, la robotique et le quantique aussi bien pour muscler sa chaîne opérationnelle et de commandement que pour rendre plus efficaces les fonctions de soutien. Or, ces domaines génèrent des quantités massives de données incitant les armées à appréhender le volet stockage dans leur feuille de route stratégique de gestion de la « data ». Et ce, aussi bien pour des raisons de coût énergétique, de facilité d'import, de réduction de l'empreinte environnementale du numérique que d'autonomie stratégique.

Selon l'Académie des technologies, « les centres de données, « cloud » inclus, stockent les mégadonnées (« big data ») numériques de l'humanité sur disques durs et bandes magnétiques dont la durée de vie limitée oblige à de dispendieuses recopies tous les cinq à sept ans ; ils représentent des « gouffres » pour les ressources en terrain, électricité, eau et matériaux rares. »

Le stockage de données à l'échelle mondiale, tous secteurs confondus, est en effet confronté à plusieurs enjeux majeurs. Le premier étant la croissance exponentielle des données générées par les États et les acteurs industriels. En 2024, la quantité de données créées, capturées, copiées et consommées mondialement est estimée à 149 zettaoctets, avec des projections atteignant 394 zettaoctets d'ici 2028. Selon des analyses récentes, environ 90 % des

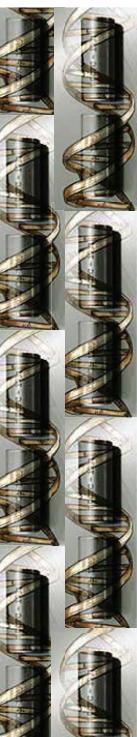
Informatique moléculaire : l'ADN au service du stockage de données massives

Par Chrystelle Roger

Conseillère stratégique, Biomemory

données mondiales ont été générées au cours des deux dernières années, et d'après l'IDC (« International Data Corporation »), le volume de données stockées à l'échelle mondiale double environ tous les quatre ans.

Par ailleurs la démultiplication des infrastructures de stockage induit des enjeux énergétiques et environnementaux majeurs. En 2023, les data centers ont consommé environ 460 térawattheures (TWh) d'électricité au niveau mondial, soit environ 2 % de la consommation électrique globale. Selon l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), l'intelligence artificielle et le cloud computing pourraient faire grimper la consommation énergétique des



data centers à 1 000 TWh par an d'ici 2030, soit l'équivalent de la consommation annuelle du Japon.

En 2024, les centres de données sont responsables d'environ 2,5 à 3,7 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, un chiffre comparable à celui de l'industrie aérienne. L'empreinte carbone ne provient pas uniquement de l'énergie consommée, mais aussi de la fabrication des infrastructures (serveurs, climatiseurs, batteries, etc.) et de leur renouvellement fréquent (tous les trois à cinq ans pour les disques durs, deux-trois ans pour les mémoires flash et cinq-sept ans pour les bandes, générant des quantités de déchets polluants). En 2022, plus de cinquante-neuf millions de tonnes de déchets électroniques ont été produites mondialement, selon l'ONU – dont une part importante provient de serveurs et composants informatiques.

Le besoin constant de performance pousse au remplacement fréquent du matériel, générant des milliers de tonnes de déchets électroniques chaque année, dont une grande partie est exportée ou mal recyclée. En outre, les datacenters nécessitent de vastes surfaces pour accueillir les infrastructures techniques, les systèmes de refroidissement et les dispositifs de sécurité. Cette emprise foncière importante peut entrer en concurrence avec d'autres usages, notamment dans les zones urbaines où le foncier est rare et coûteux.

En outre la construction de nouveaux centres de données mobilise d'importantes ressources en matières premières (béton, acier, cuivre, terres rares) et génère une empreinte carbone significative de la phase de chantier. A cela s'ajoute l'impact des chaînes d'approvisionnement associées, souvent mondialisées, qui contribuent à l'empreinte environnementale globale du numérique.

Ainsi, l'expansion continue des infrastructures de stockage et de traitement de données soulève des enjeux environnementaux majeurs qui interrogent la soutenabilité du modèle actuel.

Pour répondre à ces défis, il est essentiel de développer des solutions de stockage plus durables, sécurisées et efficaces.

L'émergence d'une nouvelle filière métier : l'informatique moléculaire

L'ADN est connu pour ses supers pouvoirs : il est extrêmement durable, avec une durée de vie pouvant aller jusqu'à des milliers d'années sous certaines conditions, ce qui en fait un support idéal pour l'archivage à long terme. On sait que la science rend possible la reconstitution du génome de mammouth laineux vieux de 1,2 million d'années et 4 000 ans après son extinction, grâce au réassemblage de brins d'ADN. L'ADN offre une densité de stockage et une longévité inégalée. On compte trois fonctions caractéristiques de l'ADN sur la donnée : la gestion, le transport et le calcul. Un seul gramme peut stocker jusqu'à 215 pétaoctets et rester stable pendant des milliers d'années.

Face aux limites des solutions actuelles, des technologies émergentes comme le stockage sur ADN offrent des perspectives prometteuses. Cette méthode permettra de stocker des volumes massifs de données de manière durable et compacte. L'informatique moléculaire qui comprend le stockage de données sur ADN et le calcul (compute) est un domaine émergent. L'informatique moléculaire est une nouvelle filière métier qui s'inscrit dans une dynamique interdisciplinaire mêlant biologie synthétique et informatique.

Parmi les pionniers de l'informatique moléculaire, Leonard Adleman (Université de Californie du Sud) est célèbre pour avoir, dès 1994, résolu un problème mathématique en utilisant de l'ADN, posant ainsi les bases de l'informatique biomoléculaire². A Harvard, le Wyss Institute a développé dès les années 2010 des systèmes de codage et décodage automatisés d'informations dans l'ADN, grâce aux travaux de George Church, autre figure majeure dans ce secteur

de recherche³. Dès 2017, le professeur Yaniv Erlich de l'université de Columbia a démontré la faisabilité d'encoder des données numériques dans des brins d'ADN en stockant le court-métrage « L'Arrivée d'un train à La Ciotat » produit par les frères Lumière en 1896.

En France, le CNRS et Sorbonne Université ont structuré des recherches via le laboratoire de biologie computationnelle et quantitative qui joue un rôle clé, notamment sur la modélisation et la manipulation de polymères biologiques. Le Programme et Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR) exploratoire MolecuArXiv, lancé en mai 2022 et piloté par le CNRS, est financé par France 2030 pour soutenir la recherche fondamentale dans le domaine du stockage moléculaire de données. Ce programme vise à positionner l'écosystème de recherche académique et industriel français comme un acteur incontournable du stockage sur polymères, qu'ils soient à base d'ADN ou non.

Biomemory est une entreprise issue du laboratoire du CNRS/Sorbonne Université, où quinze ans de recherches ont mûri les fondations de sa propriété intellectuelle. Fondé en 2021, Biomemory, basé en France, est aujourd'hui un leader mondial de l'innovation à l'intersection de la biotechnologie et des technologies de l'information et joue un rôle majeur dans la préfiguration de la filière informatique moléculaire.

Biomemory est spécialisé dans le stockage de données numériques sur ADN et a mis au point un processus de synthèse d'ADN sans pétrole, basé sur la biologie synthétique. Contrairement aux méthodes chimiques traditionnelles utilisées par d'autres entreprises, Biomemory s'inspire de 4 milliards d'années d'évolution naturelle, permettant la production de longues séquences d'ADN biosourcées, biocompatibles et biosécurisées pouvant être stockées sous forme de polymères inertes pendant des milliers d'années sans aucune consommation d'énergie. Cette approche novatrice améliore la durabilité tout en garantissant l'évolutivité et la robustesse de la technologie.

La mission de Biomemory est ainsi de répondre aux défis environnementaux posés par les centres de données. En éliminant la dépendance aux combustibles fossiles et en proposant un stockage ADN sans consommation d'énergie et

d'une durée de vie millénaire.

La méthode de stockage mise au point par Biomemory offre une solution de stockage à la fois dense, durable et écologique. Cette technologie pourrait révolutionner l'archivage des données à long terme, avec un facteur de durabilité supérieur aux disques durs actuels. Biomemory stocke l'ADN dans des DNA Cards et cible une durée de rétention garantie de 150 ans, selon les conditions environnementales des Data centers. A la fin de la décennie, Biomemory envisage une technologie ultra capacitaire éternelle avec 1 exaoctet de données dans un seul serveur de stockage. Biomemory propose une solution complète allant de la synthèse de l'ADN à l'encodage, au décodage et au stockage sécurisé des données, ce qui en fait un partenaire fiable pour les organisations en quête de solutions de stockage de pointe et de souveraineté.

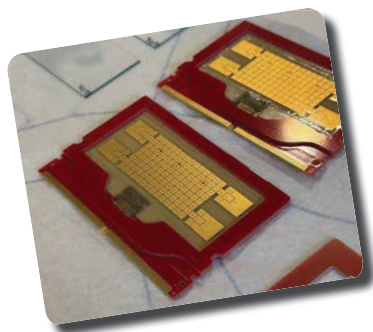
Les applications actuelles se concentrent sur l'archivage à long terme, avec des perspectives d'utilisation future dans les systèmes cloud hybrides et le stockage actif. En décembre 2024, Biomemory a levé 17 millions d'euros lors d'un financement de série A, dirigé par Crédit Mutuel Innovation, pour accélérer le développement de la technologie de stockage moléculaire.

L'informatique moléculaire comme levier de souveraineté

L'informatique moléculaire peut ainsi jouer un rôle crucial en matière de souveraineté technologique française et européenne et favoriser l'autonomie stratégique des Armées à plusieurs niveaux :

Stockage souverain et ultra-durable des données sensibles

Le stockage sur ADN offre une densité inégalée (plusieurs pétaoctets par gramme), une longévité de plusieurs millénaires, et une très faible empreinte énergétique, ce qui permettrait de conserver des archives stratégiques, comme des plans militaires, des codes de défense ou des données de renseignement, sur de longues périodes sans dépendre d'infrastructures numériques étrangères ou énergivores.



Indépendance technologique européenne

Développer des technologies d'informatique moléculaire 100 % françaises réduit la dépendance vis-à-vis des grands acteurs internationaux du cloud ou du hardware. A l'instar de l'aéronautique ou du nucléaire, cette filière pourrait être soutenue par l'État pour maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur (matériaux, procédés, logiciels, etc.).

Résilience aux cyberattaques et à l'obsolescence

Le stockage ADN est intrinsèquement sécurisé, puisqu'il reste hors ligne, le rendant ainsi immunisé contre les cyberattaques. Les processus propriétaires d'encodage et de décodage, combinés à des méthodes de chiffrement potentielles, assurent une protection robuste des données.

Rupture technologique militaire

L'intégration de l'informatique moléculaire dans les systèmes embarqués (ex. : drones, satellites, systèmes autonomes) permettrait de miniaturiser le stockage et l'analytique, ouvrant la voie à des infrastructures d'export et des plateformes

de traitement de données ultra-discrètes, autonomes et à faible consommation pour le secteur Défense et les autres secteurs représentés par OIV.

Capacité de chiffrement et de calcul biologique

L'informatique moléculaire ouvre des perspectives inédites en calcul cryptographique distribué et en intelligence embarquée biologique (bio-capteurs, analyse de données sur le terrain), permettant à terme le traitement sécurisé d'informations critiques sur site et sans dépendance au réseau.

Le ministère des Armées, comme d'autres acteurs dont les Opérateurs d'Importance Vitale (OIV), s'intéresse à la technologie Biomemory pour des raisons d'autonomie stratégique. En outre la technologie Biomemory s'inscrit naturellement dans la stratégie « climat et Défense » lancée en 2022 par le ministère pour adapter le capacitaire Défense aux impacts du changement climatique. Le commandement du combat futur (CCF), dont la mission principale est d'adapter l'armée de Terre à l'évolution accélérée des technologies et des menaces, et donc de détecter les innovations majeures pour assurer la résilience de l'outil de combat de demain, étudie par ailleurs avec intérêt la technologie Biomemory et son potentiel. Le CCF envisage ainsi de fait d'expérimenter la technologie des DNA cards sur un cas d'usage lors d'un exercice majeur de l'armée de Terre.

En structurant une véritable filière nationale, avec une gouvernance claire, des investissements stratégiques (PEPR, PIA, contrats de défense) et une coordination avec les besoins du ministère des Armées, la France pourrait devenir un acteur de premier plan dans un secteur appelé à jouer un rôle majeur dans les nouvelles conflictualités du XXI^{ème} siècle.

Notes

¹Académie des Technologies, Synthèse du rapport « Archiver les données au-delà de 2040 : les pistes de l'ADN » >>> <https://www.academie-technologies.fr/publications/archiver-les-megadonnees-au-dela-de-2040-la-piste-de-ladn/>

²Adleman, L. M. (1994). Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems. *Science*, 266(5187), 1021-1024

³<https://wyss.harvard.edu/technology/dna-data-storage/>

L'INFORMATIQUE MOLÉCULAIRE, ATOUT M2MC

Le stockage de données sur ADN, par sa densité exceptionnelle, sa résilience naturelle, sa longévité et sa discrétion, offre des perspectives particulièrement intéressantes pour les forces armées, qui opèrent de façon croissante dans un environnement dit M2MC pour « multi-milieux multi-champs » (ou MDO pour multi-domaines selon l'appellation OTAN). Cette technologie s'inscrit comme une réponse innovante aux besoins croissants en sécurisation, miniaturisation et autonomie des données dans tous les milieux, tels que :

- Le milieu terrestre : une option intéressante en mode dégradé

Sur le terrain, les forces terrestres peuvent tirer parti de l'ADN comme support de stockage robuste pour des données critiques : plans d'opérations, cartes géospatiales, profils biométriques, historiques de maintenance des systèmes, ou encore logs d'engagement. Des expérimentations sont à venir pour éprouver les DNA cards Biomemory et tester leur résistance aux environnements hostiles (poussière, humidité, chocs).

Ce type de stockage pourrait s'avérer précieux sur le plan tactique en facilitant par exemple la transmission d'un ordre de mission entre différents postes de commandement. En l'absence de connexion ou d'alimentation, l'ADN permet une conservation passive des données sensibles, lisibles a posteriori dans une base arrière sécurisée. En outre le facteur charge induit par le potentiel de miniaturisation constitue un atout clé pour contribuer à alléger l'outil de combat que cela soit sur un véhicule blindé, un véhicule léger ou un fantassin.

- Le milieu naval : l'avantage d'une bonne résistance à l'humidité

A bord de bâtiments de surface, de navires de guerre ou de sous-marins, le stockage ADN peut être utilisé pour archiver durablement des données stratégiques : manuels de maintenance, plans de mission, configurations système ou encore historiques de navigation.

Grâce à sa résistance à l'humidité et à sa durée de conservation, il est parfaitement adapté aux longues missions sous-marines. De plus, il permet de réduire le facteur place de façon significative en conservant des volumes importants de données tout en optimisant le poids et la taille des équipements embarqués comme les « datacenters ».



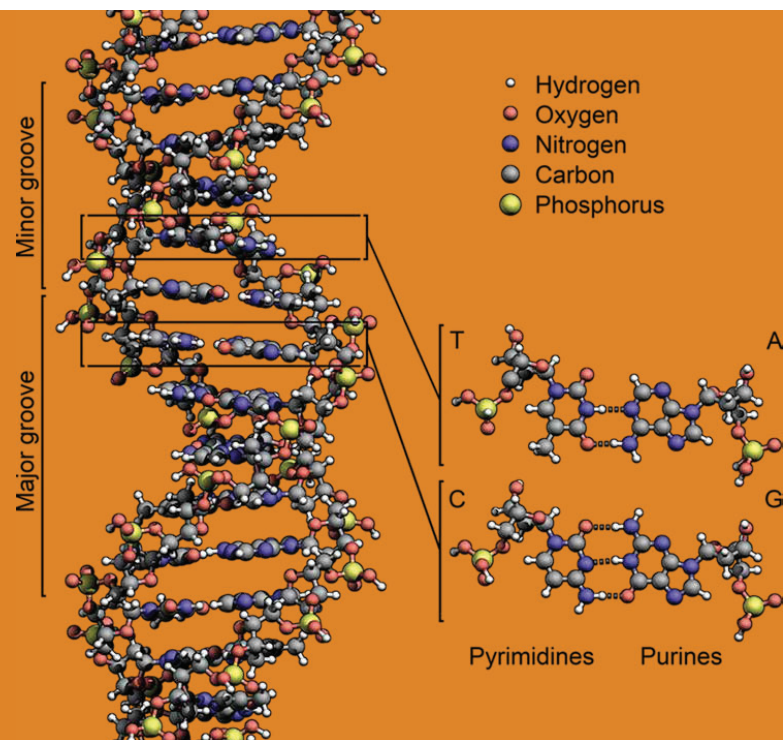


Illustration © Biomimoty

• Le milieu aéronautique : vers une boîte noire ADN

Dans le domaine aérien, cette technologie offre la possibilité de stocker localement des protocoles d'engagement, des cartes radar ou encore des configurations tactiques embarquées. L'un des cas d'usage les plus prometteurs pourrait être la « boîte noire ADN » : un support capable de survivre à un crash, aux flammes, ou à des pressions extrêmes, garantissant une récupération des données après incident, y compris dans les zones hostiles ou difficilement accessibles.

• Le milieu spatial : résoudre la problématique énergie

Pour les missions spatiales, le stockage ADN est utile car il ne nécessite aucune énergie pour la conservation. Des tests sont en cours pour confirmer la résistance aux radiations cosmiques. En outre, il peut servir à embarquer des volumes immenses de données scientifiques, des bases de connaissance, des modèles IA ou encore des contenus culturels de long terme. Biomimoty envisage de pouvoir stocker l'encyclopédie de l'humanité dans les conditions extrêmes d'autres planètes. Son format ultra-compact en fait une solution parfaitement adaptée aux contraintes de masse et de volume des satellites, sondes et stations orbitales.

En outre, l'ADN revêt nombre d'avantages en ce qui concerne les opérations discrètes ou à haut risque menées par les forces spéciales. Par exemple, un opérateur pourrait transporter dans un simple badge ou une capsule étanche des données ultra-sensibles (ex : profils cibles codés dans l'ADN, protocoles d'exfiltration, données de mission cryptées inaccessibles sans séquenceur dédié). En cas de capture, aucun support numérique ne serait détectable, ni exploitable sans équipement hautement spécialisé. Ce stockage furtif ajoute un niveau de sécurité et d'autonomie inégalé.

Enfin, en matière de soutien et de logistique, le stockage ADN peut jouer un rôle fondamental en assurant la traçabilité et la sécurisation des flux dans les chaînes d'approvisionnement. Par exemple, on pourrait encoder de l'ADN d'un jumeau numérique logistique d'un conteneur transporté par camion militaire type Hercules C-130 ou d'un navire logistique Durand.

A terme, le stockage ADN embarqué dans des pièces de rechange critiques, permettrait de conserver les spécifications techniques, les logs de maintenance, ou les certificats de conformité. Cela contribuerait à diminuer les erreurs de gestion tout en préservant l'intégrité des pièces et en limitant les falsifications, même en zone de guerre.