

Vue d'artiste de la plateforme LISA Pathfinder. Crédits ESA/ATG Medialab.

➤ LISA : Détecter les ondes gravitationnelles depuis l'espace

Il y a un peu plus d'un siècle, Einstein a fait la prédiction révolutionnaire selon laquelle lorsque des objets massifs accélèrent, ils ébranlent le tissu de l'espace-temps, produisant de minuscules ondulations connues sous le nom d'ondes gravitationnelles. Grâce aux développements technologiques modernes, nous sommes aujourd'hui en mesure de détecter ces signaux les plus insaisissables. LISA sera le premier observatoire spatial dédié à l'étude des ondes gravitationnelles.

De la terre à l'espace

Dans son numéro 2016-2 en date du 12 avril 2016, la REE relatait la première détection des ondes gravitationnelles par l'interféromètre terrestre LIGO. En conclusion, nous annonçons un futur interféromètre par ces lignes : « *La sensibilité des interféromètres terrestres est limitée entre autres facteurs par les secousses sismiques si minimes soient-elles ; il faut donc s'installer dans l'espace. Dans l'interféromètre LISA, on envisage trois satellites formant un triangle d'un million de kilomètres de côté, mais ce projet présente encore des difficultés techniques non encore résolues* ». Ce projet vient d'obtenir l'autorisation, et donc le financement de l'Agence spatiale européenne (ESA). LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) est une mission internationale de l'ESA et de la NASA associés à des industriels, qui a pour objectif la détection des ondes gravitationnelles émises par les événements les plus violents de l'Univers. Ce projet présente entre autres avantages la faculté

de s'affranchir de toute vibration sismique et de présenter des bras de 2,5 millions de km.

L'accord entre l'ESA et la NASA a été initié en 1997. Le 14 septembre 2015 a vu la première observation d'ondes gravitationnelles depuis la Terre. Le 3 décembre 2015 a été lancée la mission LISA Pathfinder, démonstrateur de la mission LISA.

L'autorisation qui fonde le projet approuve le concept et la technologie de la mission, elle donne le feu vert à la construction des instruments scientifiques et des plateformes spatiales. Ces opérations débuteront en janvier 2025 après le choix des entreprises industrielles européennes. LISA est constitué de trois satellites qui précéderont la Terre dans son orbite autour du Soleil, formant un triangle équilatéral d'une précision actuellement jamais atteinte dans l'espace. Chaque côté du triangle aura une longueur de 2,5 millions de km, soit plus de six fois la distance Terre-Lune. Les plateformes communiqueront par liaison laser. Le lancement est prévu pour 2035, à bord du lanceur Ariane.

Un schéma explicatif du fonctionnement de LISA est donné sur la figure 1. On peut y voir les trois sondes spatiales LISA en orbite terrestre autour du soleil. Le zoom dans le cercle montre l'un des vaisseaux spatiaux et les deux cubes dorés qu'il contient. En arrière-plan, une illustration de deux trous noirs en collision crée des ondulations dans l'espace-temps. L'encadré montre une séquence de triangles pour évoquer l'effet des ondes gravitationnelles sur la distance parcourue par les faisceaux laser de LISA.

Le plus grand interféromètre jamais conçu

LISA est une entreprise qui n'a jamais été tentée auparavant. L'instrumentation au sol (Ligo, Virgo), avec des bras d'interféro-

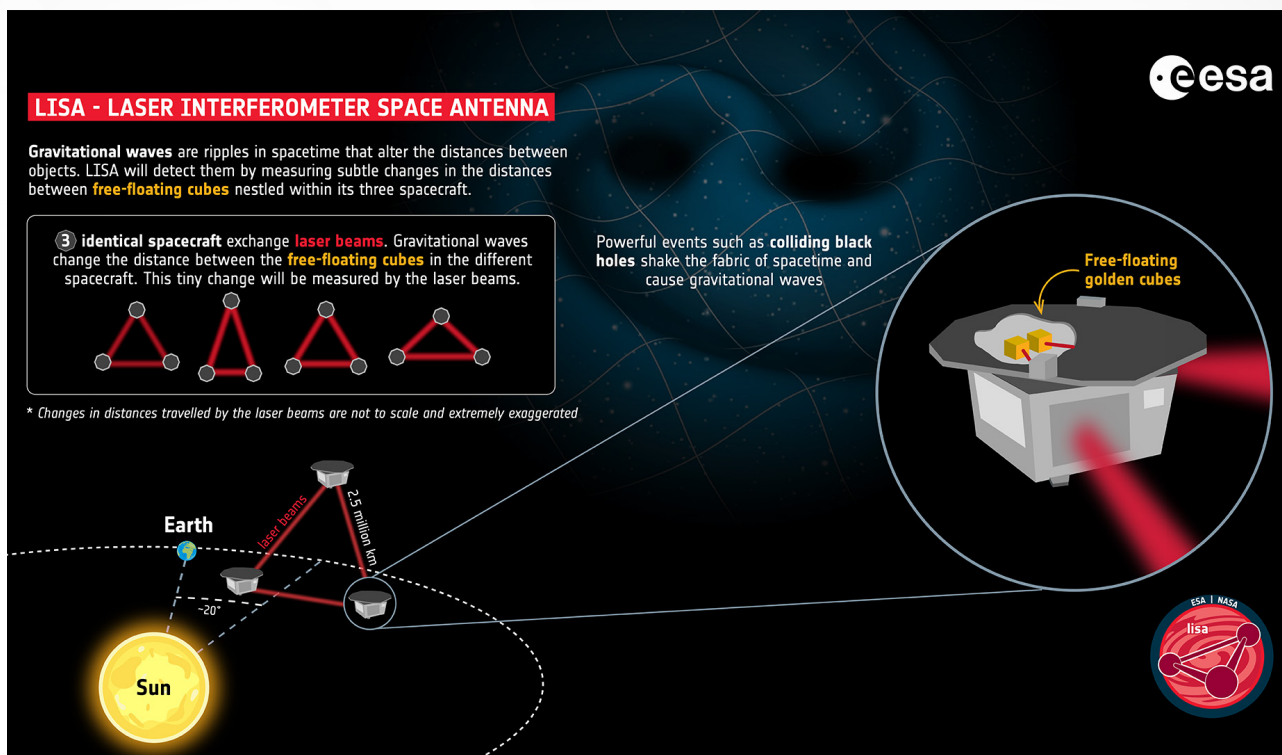


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la mission LISA. Crédits : ESA / ATG Medialab.

mètres sur des distances de quelques kilomètres, ne peut détecter que les ondes gravitationnelles provenant d'événements impliquant des énergies extrêmes comme les explosions de supernovae ou la fusion de trous noirs de masse stellaire. Pour repousser les frontières de l'étude gravitationnelle, la seule solution est de se situer dans l'espace. LISA utilisera l'interférométrie laser, une technique qui observe le motif qui se produit lorsque deux faisceaux de lumière se situent à des points différents de leur cycle d'ondes au même moment.

Pour faire simple, l'interféromètre est composé de trois plateformes éloignées entre elles de 2,5 millions de km qui en constituent ainsi les bras. Ces plateformes évoluent sur la même orbite que la Terre, mais à 50 millions de km en avance par rapport à elle. La précision de la mesure des interférences est de 10^{-11} m. On peut comparer cette précision avec la taille du proton qui est de $0,877 \cdot 10^{-15}$ m.

Grâce à la taille des bras de l'interféromètre, la gamme des fréquences couvertes peut aller de 0,1 mHz à 1 Hz, soit une longueur d'onde pouvant atteindre 3 millions de km, ce qui est bien sûr impossible à obtenir sur Terre.

Notons que la mesure des ondes gravitationnelles dans l'espace n'a encore jamais été entreprise. Avant même que l'ESA puisse envisager la mission LISA, de nouvelles technologies ont dû être inventées et testées. La mission LISA Pathfinder a été construite en premier lieu pour démontrer que la technologie nécessaire fonctionnerait dans l'espace.

Des cubes en or placés en lévitation

Pour détecter les ondes gravitationnelles, LISA utilisera des paires de cubes d'or et platine massifs flottant librement dans un boîtier conçu spécialement au cœur de chaque plateforme (figure 2). Les ondes gravitationnelles provoqueront de minuscules changements dans les distances entre ces cubes dans les différents engins spatiaux. Le vaisseau spatial doit être conçu de manière à s'assurer que rien, en dehors de la géométrie de l'espace-temps lui-même, n'affecte le mouvement des masses, qui sont en chute libre.

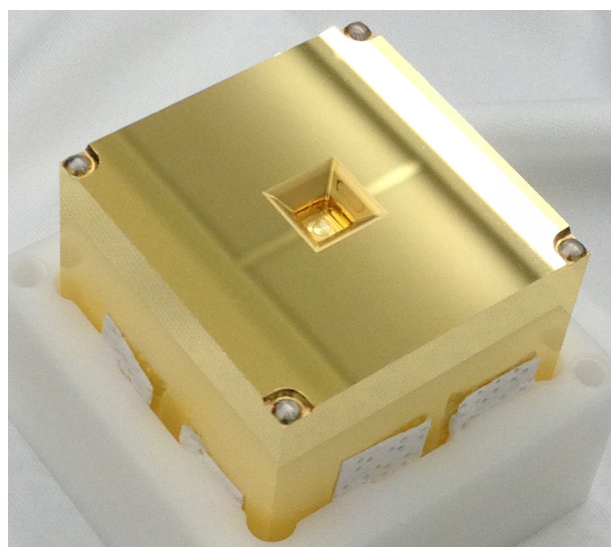


Figure 2 : Vue de l'un des cubes en or positionnés au cœur des plateformes LISA. Crédits : ESA/ATG Medialab.

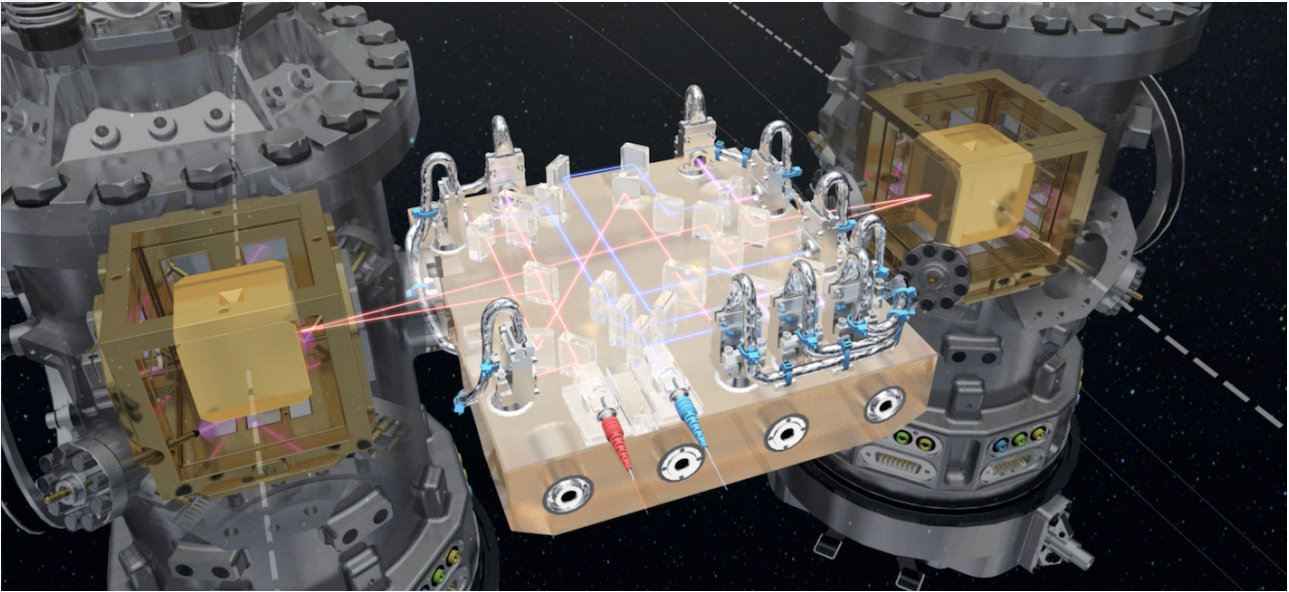


Figure 3 : Dispositif de maintien des cubes en position. Crédits : ESA/ATG Medialab.

- Au cœur des plateformes de LISA Pathfinder se trouvent les deux cubes identiques en or et platine de 46 mm, flottant librement, à quelques millimètres des parois de leurs boîtiers (figure 3). Les cubes sont séparés de 38 cm et reliés uniquement par des faisceaux laser pour mesurer leur position en continu. Pendant la phase des opérations scientifiques, les micropropulseurs effectueront de minuscules décalages afin de maintenir le vaisseau spatial centré sur l'un des cubes. Cela isolera les deux cubes de toutes les forces externes et internes à l'exception de la gravité, les plaçant ainsi dans la chute libre la plus précise jamais obtenue.

Les premiers instants de l'Univers

Depuis que l'astronomie existe, les observations se basent sur l'observation de la lumière et des ondes radio, c'est-à-dire l'observation des ondes émises ou réfléchies par les astres. Cette contrainte interdit l'observation des premiers instants de l'Univers. Les modèles physiques ont montré que dans les tout premiers instants – une période d'environ 380 000 ans tout de même – l'univers était tellement dense qu'aucune particule ne pouvait s'y propager en ligne droite en raison de collisions multiples. Ainsi ce que nous pouvons observer de l'univers date d'après cette époque dite de recombinaison. En revanche, les ondes gravitationnelles présentent une nouvelle variable d'observation qui n'est pas contrainte par cette loi.

La mission détectera la résonance gravitationnelle prédite dès les premiers instants de notre univers et pourra offrir un aperçu direct des toutes premières secondes après le début de l'inflation. De plus, comme les ondes gravitationnelles transportent des informations sur la distance des objets qui les ont émises, LISA aidera les chercheurs à mesurer le changement intervenu pendant l'expansion de l'univers à l'aide d'un type de critère différent des techniques utilisées par la mission Euclid et autres relevés, validant ainsi leurs résultats. LISA détectera, dans l'ensemble de l'univers, les ondula-

tions de l'espace-temps causées par la collision d'énormes trous noirs au centre des galaxies. Cela permettra aux scientifiques de retracer l'origine de ces objets monstrueux, de suivre comment ils deviennent des millions de fois plus massifs que le Soleil et d'établir le rôle qu'ils jouent dans l'évolution des galaxies. Dans notre propre galaxie, LISA détectera de nombreuses paires d'objets compacts en fusion comme des naines blanches ou des étoiles à neutrons et nous donnera un aperçu unique des dernières étapes de l'évolution de ces systèmes.

Vers un nouveau domaine d'observation de l'Univers

Il est désormais avéré que la matière visible, celle qui constitue aussi bien les êtres vivants que les étoiles et les galaxies ne représente que quelques pourcents de l'Univers. Tout le reste ne vérifie ni les lois de Newton, ni celles d'Einstein. L'alternative est simple : soit il faut trouver de nouvelles lois qui soient applicables dans l'ensemble de l'Univers, soit il faut admettre que plus de 95% de celui-ci est constitué d'une matière que nos instruments optiques et radio ne peuvent pas détecter. La mission LISA fera avancer cette nouvelle méthode d'investigation basée sur l'étude des ondes gravitationnelles qui s'affranchit du rayonnement optique et radio.

En 2035, les trois plateformes seront lancées pour arriver en 2037 à leur positionnement final permettant le début des opérations.

Si nous imaginons que, jusqu'à présent nous avons regardé le cosmos comme un film muet, capturer les ondulations de l'espace-temps avec LISA apportera une nouvelle dimension comme lorsque le son a été ajouté aux films jusqu'alors muets.

Rendez-vous donc en 2037... ■

André Deschamps, Membre senior SEE

➤ En route vers une Intelligence Artificielle Générale (IAG) ?

L'Intelligence artificielle (IA) actuelle est encore restreinte et se limite à des tâches spécifiques. L'avènement de ChatGPT en fin 2022 a toutefois marqué un saut notable dans la qualité des résultats et des performances de l'IA. Beaucoup ne croyaient pas que ce niveau de performance soit même possible si vite. La possibilité d'une Intelligence Artificielle Générale (IAG) qui égalerait voire dépasserait l'homme pour de nombreuses tâches cognitives semble maintenant plus crédible.

La création de l'IAG est maintenant l'un des principaux objectifs d'entreprises telles que OpenAI (fournisseur de ChatGPT), Microsoft, Google, DeepMind ou Meta. Cependant, il y a encore des débats sur la date de l'avènement réel de l'IAG : dans quelques années, quelques décennies ou voire même jamais ?

Vers l'assistant universel ¹

La nouvelle version Gemini-2 illustre les progrès rapides du domaine de l'IA. L'objectif est de créer de nouveaux agents IA susceptibles de devenir de véritables assistants universels pour la vie de tous les jours, que ce soit dans un environnement professionnel ou privé. Par rapport à la version Gemini 1.0 sortie en décembre 2023, les versions 1.5 et 2 sont caractérisées par :

- la *multimodalité* avec des dialogues par le texte, l'audio, les images, les vidéos ou le code (utilisation de l'IA pour programmer). Ce n'est donc plus cantonné au texte.
- une meilleure prise en compte du contexte de l'utilisateur, avec une mémoire des dialogues passés ;
- la possibilité d'anticiper les demandes et même d'agir au nom de l'utilisateur sous sa supervision. On passe du mode réactif actuel à un mode plus proactif.

Gemini est déjà utilisé par des millions de développeurs. Google l'utilise pour ses produits (2 milliards d'utilisateurs) comme par exemple *NotebookLM* qui est un assistant de recherche et de prise de notes, utilisé par les entreprises ou les chercheurs, ou comme Deep Research, qui utilise des capacités avancées de raisonnement et de contexte

¹ <https://blog.google/technology/google-deepmind/google-gemini-ai-update-december-2024/#ceo-message>

long, explore des sujets complexes et compile des rapports spécifiques pour l'utilisateur. Dans une prochaine étape prévue pour début 2025, les capacités de raisonnement avancées de Gemini 2.0 permettront de traiter des sujets comme des équations mathématiques complexes, des requêtes multimodales et du codage. Ces capacités s'appuient sur du matériel personnalisé tel que Trillium, TPU (*Tensor Processing Unit*) de sixième génération.

Présentation de Gemini 2.0 Flash de Google

Outre la prise en charge des entrées multimodales telles que les images, la vidéo et l'audio, Flash 2.0 intègre les sorties multimodales telles que les images générées nativement mélangées à du texte et à de l'audio en multilingue et adaptable de type texte-parole (TTS : *Text-to-speech*). Gemini parle plusieurs langues et ses réponses s'adaptent à l'interlocuteur. Il peut appeler en mode natif des outils tels que Google Search, l'exécution de code ainsi que des fonctions tierces définies par l'utilisateur, ce qui permet d'effectuer des tâches en son nom. Il effectue le suivi et la planification d'instructions complexes avec l'appel des outils associés. Par ailleurs, il améliore la latence ce qui rend l'assistant plus réactif.

Le tableau 1 montre les performances que Google annonce, avec de très bons résultats pour la programmation ou les problèmes de mathématiques. Les domaines à améliorer concerne la traduction automatique, la programmation sur des systèmes récents (car l'apprentissage n'est pas achevé). Notons les capacités fortes d'analyse vidéo sur plusieurs domaines.

Gemini 2.0 Flash est disponible en tant que modèle expérimental pour les développeurs via des API dans *Google AI Studio* et *Vertex AI*. Ces APIs sont en mode multimodal pour permettre des dialogues texte, audio ou vidéo.

Google explore les possibilités de l'IA avec une série de prototypes d'assistance aux personnes : le projet *Astra* sur les capacités futures d'un assistant universel d'IA, le projet *Mariner* sur l'interaction homme-assistant (d'abord via un navigateur) ou le projet *Jules*, assistant pour les développeurs.

Projet Astra ² : il s'agit d'explorer les dialogues et interactions possibles avec l'homme, par exemple l'assistant peut aider à utiliser une machine à laver, ou à donner le code Airbnb pour entrer dans une location (il faut

² <https://www.youtube.com/watch?v=hlllJt8JERl>

CAPABILITY	BENCHMARK	DESCRIPTION	Gemini 1.5 Flash 002	Gemini 1.5 Pro 002	Gemini 2.0 Flash Experimental
General	MMLU-Pro	Enhanced version of popular MMLU dataset with questions across multiple subjects with higher difficulty tasks	67,3 %	75,8 %	76,4 %
Code	Natural2Code	Code generation across Python, Java, C++, JS, Go. Held out dataset HumanEval-like, not leaked on the web	79,8 %	85,4 %	92,9 %
	Bird-SQL (Dev)	Benchmark evaluating converting natural language questions into executable SQL	45,6 %	54,4 %	56,9 %
	LiveCodeBench (Code Generation)	Code generation in Python. Code Generation subset covering more recent examples: 06/01/2024 - 10/05/2024	30,0 %	34,3 %	35,1 %
Factuality	FACTS Grounding	Ability to provide factuality correct responses given documents and diverse user requests. Held out internal dataset	82,9 %	80,0 %	83,6 %
Math	MATH	Challenging math problems (incl. algebra, geometry, pre-calculus, and others)	77,9 %	86,5 %	89,7 %
	HiddenMath	Competition-level math problems, Held out dataset AIME/AMC-like, crafted by experts and not leaked on the web	47,2 %	52,0 %	63,0 %
Reasoning	GPQA (diamond)	Challenging dataset of questions written by domain experts in biology, physics, and chemistry	51,0 %	59,1 %	62,1 %
Long context	MRCR (1M)	Novel, diagnostic long-context understanding evaluation	71,9 %	82,6 %	69,2 %
Image	MMMU	Multi-discipline college-level multimodal understanding and reasoning problems	62,3 %	65,9 %	70,7 %
	Vibe-Eval (Reka)	Visual understanding in chat models with challenging everyday examples. Evaluated with a Gemini Flash model as a rater	48,9 %	53,9 %	56,3 %
Audio	CoVOST2 (21 lang)	Automatic speech translation (BLEU score)	37,4 %	40,1 %	39,2 %
Video	EgoSchema (test)	Video analysis across multiple domains	66,8 %	71,2 %	71,5 %

Tableau 1 : Performances de Gemini-2.

●●● donc que l'agent accède aux mails reçus d'Airbnb). Dans le domaine professionnel, les applications sont nombreuses, par exemple pour des techniciens de maintenance qui ont besoin d'informations. Les axes d'amélioration concernent :

- un meilleur dialogue avec la capacité de converser dans plusieurs langues ou dans des langues mixtes, une meilleure compréhension des accents et des mots peu communs ;

- une plus grande intégration des outils. Pour Google, il s'agit par exemple de pouvoir utiliser Google Search, Lens et Maps pour un assistant dans la vie quotidienne.

- une meilleure mémoire de la session et des conversations du passé pour permettre une meilleure personnalisation ;

- une amélioration de la latence. Notamment, l'assistant doit comprendre le langage comme lors d'une conversation humaine.

Ces besoins ont un impact sur la consommation carbone (consommation d'énergie pour le cloud et pour effectuer les calculs), sur le dimensionnement des réseaux (des dialogues en vidéo peuvent saturer les liens d'accès) et sur les terminaux (par exemple des lunettes interactives).

Projet Mariner³ : il s'agit d'explorer comment les agents peuvent prendre des initiatives et aider à accomplir des tâches complexes sous la supervision de leur utilisateur. Pour l'instant, Google commence par une extension de

³ https://www.youtube.com/watch?v=_uBg6syzXhk

son navigateur Chrome qui accomplit des tâches web pour l'utilisateur (remplir un formulaire, explorer un sujet...).

Le sujet de la supervision de l'agent est critique, par exemple, pour éviter la divulgation d'informations, ou même pour éviter des actions erronées. Il est très important de conserver l'humain dans la boucle. Par exemple, Mariner ne peut taper, faire défiler ou cliquer que dans l'onglet actif du navigateur de l'utilisateur et il demande à celui-ci une confirmation finale avant d'entreprendre certaines actions sensibles, comme un achat.

Projet Jules : il s'agit d'explorer comment les agents peuvent aider les développeurs. Jules est un agent expérimental de programmation qui s'intègre directement dans un flux de travail GitHub (par exemple pour la programmation des pages web, ou pour les communautés Open Source). Il peut s'attaquer à un problème, développer un plan, l'exécuter sous la direction et la supervision d'un développeur.

Autres domaines d'assistance : les jeux vidéo

Un agent peut aider à naviguer dans le monde virtuel des jeux vidéo. L'agent devient un véritable compagnon de jeu, voire un véritable coach. Il a la capacité de raisonner sur le jeu en se basant uniquement sur l'action à l'écran et de proposer des suggestions en dialoguant en temps réel avec le joueur. Il peut aussi utiliser Google Search pour chercher des informations sur le jeu et mieux conseiller le joueur. Un autre exemple, concerne le domaine industriel avec un agent capable d'aider dans le monde physique en ayant des capacités de raisonnement spatial, ce qui est intéressant pour les applications industrielles de la robotique.

La nécessité de développer les agents de manière responsable

Le développement des agents avec l'IA soulève de nombreuses questions en matière de sûreté, de sécurité et d'éthique. Un agent doit respecter la confidentialité des échanges par exemple. Les entreprises qui utilisent aujourd'hui ChatGPT se tournent d'ailleurs vers la version entreprise pour s'assurer que leurs données restent confidentielles. Par exemple, une entreprise comme Orange a sa version propre de ChatGPT pour ses 60 000 utilisateurs afin d'être certain que ses données ne se retrouvent pas dans un cloud externe.

Pour tenir compte de ces aspects, Google indique que ses développements se font de façon exploratoire et progressive, en travaillant avec des testeurs de confiance et des experts externes, et en procédant à des évaluations approfondies des risques et de la sécurité :

- Mise en place d'un comité de responsabilité et de sécurité, pour identifier et comprendre les risques potentiels.

- Utilisation des capacités de raisonnement de Gemini 2.0 pour aller au-delà de la simple détection des risques, pour aider à produire des évaluations de sécurité, pour générer les données nécessaires d'entraînement de l'agent qui permettront de minimiser les risques de sécurité.

- Evaluer mieux la complexité des résultats en mode multimodal, en testant et en entraînant le modèle à travers les entrées et sorties d'images et de sons afin d'améliorer la sécurité.

- Etudier les moyens d'éviter que les utilisateurs ne partagent involontairement des informations sensibles avec l'agent, par exemple en intégrant des contrôles de confidentialité qui permettent aux utilisateurs de supprimer facilement des sessions. Il faut aussi que les agents constituent des sources d'information fiables et n'entreprennent pas d'actions involontaires au nom de l'utilisateur.

- Veiller à ce que le modèle apprenne à donner la priorité aux instructions de l'utilisateur plutôt qu'aux tentatives d'injection de messages par des tiers (notification web par exemple), afin d'identifier les instructions potentiellement malveillantes provenant de sources externes et d'empêcher toute utilisation abusive. Cela permet d'éviter que les utilisateurs ne soient exposés à des tentatives de fraude et d'hameçonnage par le biais d'instructions malveillantes dissimulées dans des courriels, des documents ou des sites web.

La route vers l'AIG semble encore longue

Nous sommes encore au début du chemin vers l'IAG. Les progrès techniques sont considérables et avec un entraînement suffisant, il serait peut-être possible d'atteindre le niveau de performance requis. Cependant, nous ne savons pas encore quel est le niveau d'entraînement nécessaire. Au-delà des difficultés techniques, il y a encore de nombreuses questions qui se posent au niveau sûreté, sécurité, éthique, responsabilité, confidentialité... Elle se posent en plus de manière différente selon chaque cas d'usage. Par ailleurs, il ne faut pas négliger l'acceptabilité des assistants par la société, notamment du fait de l'impact de l'IA sur la transformation des métiers et des emplois. Enfin, nous n'avons pas encore une idée claire de la consommation en CO₂ associée aux dialogues avec les agents IA. L'avènement de LLM entraîné de façon frugale comme DeepSeek (qui fera l'objet d'un article au prochain numéro) est un signe positif. Enfin, l'utilisation intensive des réseaux et des centres de données nécessitera la révision de leur dimensionnement. ■

Roberto Kung, Membre senior SEE



Les surfaces reconfigurables intelligentes (RIS)

Les réseaux d'accès radio vont bientôt pouvoir bénéficier de l'innovation qu'apportera l'utilisation de surfaces « intelligentes » permettant le contrôle du canal de propagation et la réduction de l'énergie rayonnée.

Les surfaces reconfigurables intelligentes, appelées « *Reconfigurable Intelligent Surfaces* » (RIS) en anglais, sont des miroirs électromagnétiques programmables qui ont pour objet de recevoir une onde électromagnétique et de la réfléchir vers le ou les utilisateurs à qui elle est destinée ¹.

Les réflexions de l'onde électromagnétique entre l'émetteur et le récepteur ne sont donc plus subies mais contrôlées. Ceci permet d'améliorer le bilan de liaison et d'augmenter la capacité de transmission du canal de propagation.

Une RIS est en général une surface plane composée d'un grand nombre d'éléments passifs, appelés cellules unitaires. Des diodes PIN, des varactors ou d'autres types de commutateurs radiofréquence à base de métasurfaces, sont intégrés sur ces cellules. Il est alors possible d'ajuster dynamiquement la phase, l'amplitude ou la polarisation des ondes réfléchies par ces cellules.

La figure 1 illustre le cas d'une RIS qui réfléchit une onde émise par une station d'émission, notée BS, vers deux terminaux d'utilisateurs, notés respectivement UE₁ et UE₂.

C'est la modification des phases des ondes réfléchies par les différentes cellules des RIS qui permet de dévier et de focaliser les

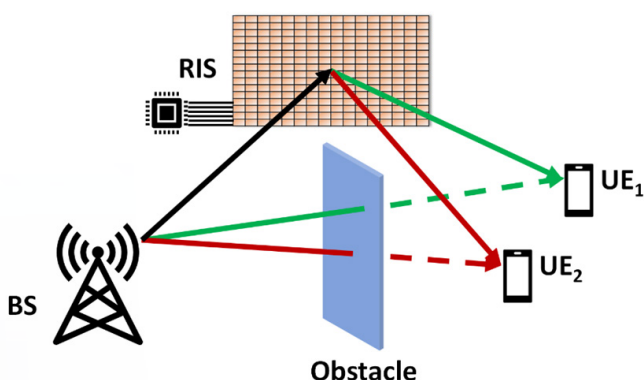


Figure 1 : Système de transmission mobile intégrant une RIS.

1. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah and C. Yuen, «*Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication*,» IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 8, pp. 4157-4170, Aug. 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2922609.

faisceaux dans les directions souhaitées. Ces phases sont précalculées et enregistrées dans des dictionnaires. En cours de fonctionnement elles sont ensuite envoyées aux cellules unitaires via un microcontrôleur central, comme illustré sur la figure 2.

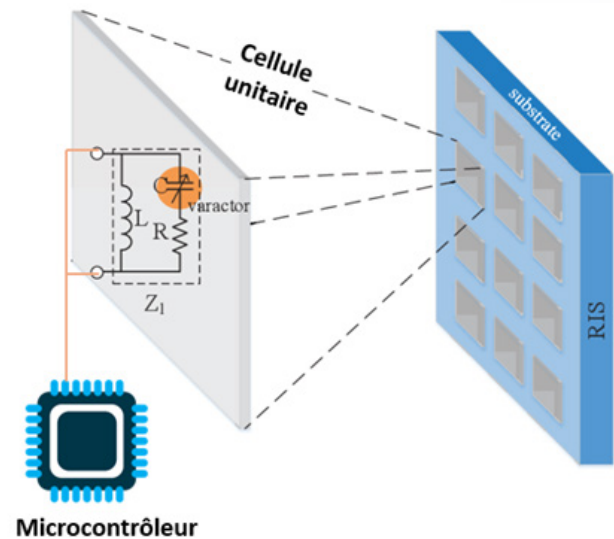


Figure 2 : Schéma de principe de la cellule unitaire d'une RIS à base de varactor.

La constitution du dictionnaire des phases passe par une étape de calibration qui consiste à découvrir l'environnement permettant de localiser le ou les utilisateurs. Durant cette étape il faut estimer toutes les caractéristiques des canaux de propagation entre l'émetteur et chaque cellule et entre chaque cellule et les différents récepteurs. Les phases sont souvent quantifiées sur un nombre d'états réduits, afin de limiter le volume de données à stocker dans le dictionnaire.

La figure 3 montre les phases et le champ rayonné pour une RIS constituée de 20x20 cellules unitaires pointant vers un utilisateur situé à la normale de surface et en champ lointain. La matrice de phase dite continue est calculée analytiquement pour garantir une superposition constructive des ondes issues de toutes les cellules dans la direction de l'utilisateur. Elle est représentée sur la gauche de la figure 3 avec des phases allant, de manière continue, de 0 à 2π avec un code de couleur allant du noir, pour $\phi=0$, au jaune pour $\phi=2\pi$. La matrice des phases quantifiées sur 1 bit est représentée sur le milieu de la figure 3 avec la couleur noire pour $\phi=0$ et jaune pour $\phi=\pi$. Pour cette simulation, l'onde est émise via une antenne cornet située derrière la RIS à une distance focale optimisée pour assurer le meilleur transfert d'énergie vers toutes les cellules de la RIS.

L'utilisation des RIS est essentiellement prévue pour des communications dans des bandes millimétriques entre 30 GHz et 300 GHz ². Les largeurs des bandes de fréquences disponibles dans ces

2 W. Saad, M. Bennis, and M. Chen. "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems" IEEE Network, 34(3):134-142, 2020.

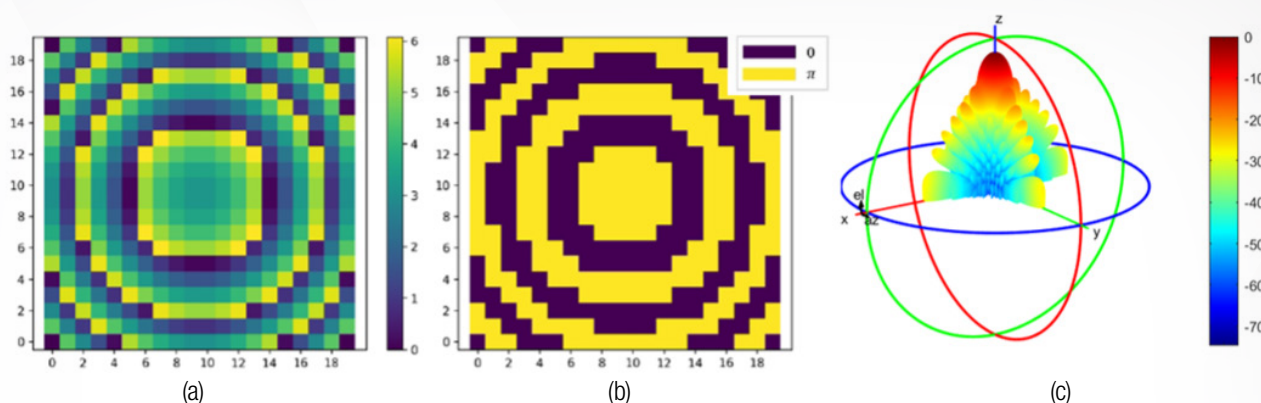


Figure 3 : (a) Matrice de phase continue ; (b) matrice de phase quantifiée sur 1 bit ; (c) champ rayonné par une RIS 20x20.

bandes millimétriques sont très élevées, ce qui se traduit directement par des capacités de transmission très importantes. En revanche, les pertes de pénétration à travers les matériaux sont très fortes et l'impact des obstacles est très conséquent sur les débits des transmissions. Il est donc particulièrement utile de pouvoir mettre en œuvre des réflexions directionnelles entre l'émetteur et le récepteur au moyen des RIS.

Le projet européen « *Reconfigurable Intelligent Sustainable Environment* » (RISE-6G, <https://rise-6g.eu/>), coordonné par le CEA LETI, s'intéresse aux métamatériaux utilisés pour constituer les cellules élémentaires des RIS. La fabrication entraîne des travaux de recherche et développement dans le domaine des matériaux à changement de phase et des semi-conducteurs à commutation rapide. Il est aussi très important de s'assurer de l'uniformité des cellules qui constituent les RIS.

D'un point de vue algorithmique les RIS entraînent de nombreux développements avec beaucoup de nouveaux sujets, en particulier dans le domaine de l'allocation des ressources. Le contrôle dynamique des RIS avec une très faible latence, en cas de mobilités des émetteurs et des récepteurs, demande aussi le développement d'algorithmes de reconfiguration et de pistage très rapides.

La découverte de tous les canaux de propagation est aussi un défi majeur de la mise en œuvre des RIS. Des stratégies optimisées de distribution de signaux pilotes doivent être mises en œuvre dans cette phase.

Les RIS sont constituées de cellules passives mais les circuits de commande ont une consommation énergétique qu'il faut minimiser pour ne pas arriver à un bilan énergétique global trop important. Cependant la focalisation des ondes vers l'émetteur permet en général de réduire la puissance émise et le bilan énergétique global reste très favorable.

Il reste enfin la question pratique du déploiement en intérieur et en extérieur qui demande des installations assez conséquentes et des autorisations nombreuses et parfois difficiles à obtenir.

En conclusion l'apparition des RIS dans les réseaux d'accès radio est une innovation très importante qui conduit à prendre en partie le contrôle du canal de propagation, alors que les systèmes actuels se concentrent surtout sur l'égalisation du canal en réception. De très nombreux nouveaux défis technologiques et algorithmiques sont introduits par l'emploi des RIS et l'optimisation des transmissions directionnelles qu'elles permettent auront un impact important sur la réduction de l'énergie rayonnée par les réseaux d'accès radio. ■

Hmaïed Shaïek, Maître de Conférences au CNAM

Michel Terré, Professeur au CNAM

➤ Quelques nouveautés au CES Las Vegas 2025

La manifestation mondiale consacrée à l'électronique grand public qui est en général révélatrice des grandes tendances technologiques du domaine s'est tenue à Las Vegas du 7 au 10 janvier 2025. A la fois exposition et conférence, elle a réuni plus de 4500 exposants dont 1400 startups, parmi lesquelles figuraient 150 startups françaises. Deux-cent cinquante sessions de conférences réunissant plus de 1000 conférenciers ont permis aux entreprises du domaine d'annoncer leurs nouveaux produits ou leurs projets. En particulier le PDG de NVIDIA a pu annoncer lors d'une « Keynote session » des cartes graphiques de nouvelle génération RTX 5000 et son projet « Digits » de superordinateur personnel destiné aux développeurs de projets d'IA et aux étudiants, fondé sur sa puce « GB10 Grace Blackwell ». Ce dernier produit devrait être disponible en mai prochain.

Les produits exposés au CES confirment l'omniprésence de l'IA dans les différents domaines de l'électronique grand public notamment dans les équipements de la maison comme les robots ménagers.

Par exemple ont été présentés des robots aspirateurs ménagers de plus en plus sophistiqués : celui de la société chinoise Roborock a fait sensation car il possède un bras robotique ca-

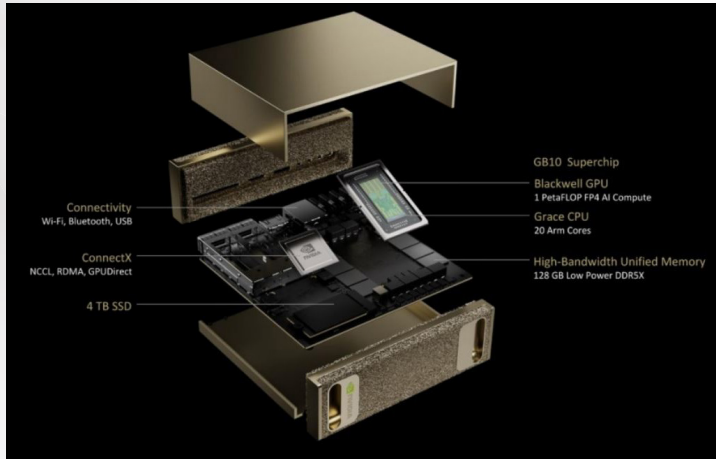


Figure 1 : Super ordinateur personnel NVIDIA-Digits. Source : NVIDIA.

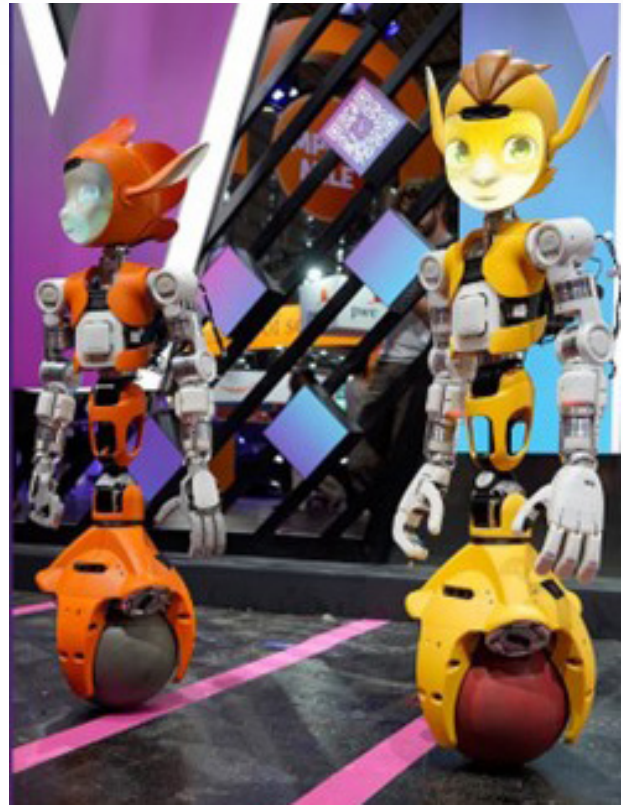


Figure 2 : Robots Mirokai de la société Enchanted Tools. Source : Enchanted Tools.

- pable de ramasser au sol un objet de quelques centaines de grammes et de le porter dans une zone de rangement : il devrait être disponible au deuxième semestre 2025 en France.

Le robot humanoïde français Mirokai de la société Enchanted Tools fondée par des anciens d'Aldebaran, expérimenté dans des hôpitaux français notamment, a été mis en avant dans la présentation du PDG de NVIDIA dont il utilise la technologie pour l'animation du « visage ».

Le millésime 2025 n'a pas été marqué par de grandes nouveautés technologiques. Le domaine de la mobilité électrique a semblé marquer un creux : il faut noter, toutefois, la présentation de camions et d'engins de chantier électriques qui passent du domaine des outils spéciaux d'intervention dans les mondes souterrains ou sous-marins à celui de la décarbonation des engins de travaux publics. On note aussi une reprise sur le domaine du véhicule autonome. Néanmoins, il faut noter les annonces du Taiswanais Prologium, spécialiste des batteries Lithium-céramique, qui confirme l'ouverture de sa méga-usine de Dunkerque en 2027 et anticipe des performances remarquables en matière de vitesse de recharge de sa batterie : elle pourrait faire acquérir 300 km d'autonomie au véhicule par une recharge de 4 à 5 minutes à un prix qui serait voisin de celui des batteries actuellement utilisées sur les véhicules électriques. De quoi lever les blocages actuels à l'achat des véhicules électriques ?

Beaucoup de lunettes connectées ont été présentées : par exemple, celles de Xanderglass (USA) sont équipées de micros permettant aux personnes malentendantes de lire le contenu de la conversation à laquelle elles participent, affiché sur leurs lunettes comme on lit un sous-titre au cinéma. De façon générale les lunettes connectées se voient peu à peu affecter des fonctions qui étaient jusqu'à présent celles des smartphones. Une illustration de cette tendance est parfaitement donnée par les lunettes de Halliday smart Glasses qui laissent envisager des utilisations alléchantes : un prompt pour les présentations, un guidage pour s'orienter, un agenda avec memos de rappel ou tout simplement

des traductions simultanées. L'interaction avec les lunettes est assurée via une bague.

Parmi les objets dédiés à la santé et au bien-être, le français Withings a présenté un miroir connecté prototype, OMNIA, qui embarque de nombreuses fonctionnalités pour avoir en un coup d'œil un aperçu assez complet de la forme du moment de l'utilisateur avec une vue interactive sur ses différents paramètres de santé.

Enfin plus anecdotique, la cuillère connectée japonaise a eu beaucoup de succès médiatique : elle donne, par un effet électrique, un goût de sel à un aliment non salé : parfait pour accepter un régime sans sel ? ■

Patrice Collet, Membre émérite SEE



Figure 3 : La cuillère qui sale - Source : Kirin.