

## ► L'industrie du ciment projette une décarbonation ambitieuse

**La fabrication du ciment traditionnel est très polluante. Elle nécessite notamment beaucoup d'énergie pour produire le « clinker », composant principal du ciment. Pour réduire son empreinte carbone de 80 % à l'horizon 2050, l'industrie cimentière doit donc innover.**

### L'impact carbone du béton traditionnel

La production de ciment engendre annuellement en France près de 10 millions de tonnes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), ce qui équivaut à environ 3 % des émissions totales du pays. Les deux tiers de ces émissions sont directement attribuables au processus chimique de fabrication du ciment, en particulier lors de la production du « clinker », l'élément central du ciment qui est élaboré à partir de calcaire et d'argile. Le tiers restant des émissions provient de la combustion d'énergies fossiles.

L'exemple du ciment Portland est en ce sens significatif : c'est celui qu'on utilise le plus couramment pour la fabrication du béton armé ou du béton précontraint (figure 1) :

- le ciment est extrait des carrières de production à l'état de matière première, puis concassé, séché et broyé ;
- le matériau est ensuite soumis à une phase de cuisson (ou clinkérisation) à très haute température (1450 °C) durant une période très longue (18 heures). Une phase excessivement énergivore à l'origine de la mauvaise empreinte carbone du béton traditionnel.

### Les cibles de décarbonation du ciment

Le secteur de la construction, responsable de 37 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, doit amorcer sa décarbonation. Une « révolution » puisque le secteur doit utiliser moins de béton

et plus de matières premières locales issues de la biomasse (chanvre, paille, bois...) ou recyclées.

Le syndicat français du secteur, France Ciment, s'est fixé un objectif ambitieux, visant une réduction de 50 % des émissions d'ici 2030. La réussite de ce défi technique repose sur trois principaux leviers de décarbonation :

- le remplacement des combustibles fossiles par des combustibles alternatifs, comme la biomasse ;
- le développement de nouveaux ciments, parfois à base de composants recyclés ou de co-produits d'autres industries, afin de réduire le taux de clinker dans la formulation du ciment ;
- le captage, stockage ou utilisation du carbone en sortie d'usine.

La stratégie de décarbonation du secteur comporte plusieurs limites. Tout d'abord, le potentiel d'augmentation de production de la biomasse en France est restreint, étant donné que de nombreuses industries souhaitent y avoir accès, et il entre en concurrence avec d'autres usages (production alimentaire, biodiversité, etc.). En parallèle, le captage et stockage du carbone (CCS) issu des cimenteries demeure une solution technologique extrêmement coûteuse avec le risque de retarder la mise en œuvre des autres leviers de décarbonation.

Le levier le plus prometteur, qui consiste à développer des ciments à faible teneur en clinker, est en théorie déjà disponible.

### Béton bas-carbone de quoi s'agit-il ?

Terre crue, pierre, bois... S'il est urgent de continuer à accélérer le recours aux matériaux bio et géosourcés, le béton reste aujourd'hui indispensable pour certains aspects de la construction (fondations, voiles de superstructures, etc.). Pour des raisons de solidité et de sécurité, certaines parties doivent souvent être construites en béton.

## Comment est fabriqué le ciment traditionnel Portland ?

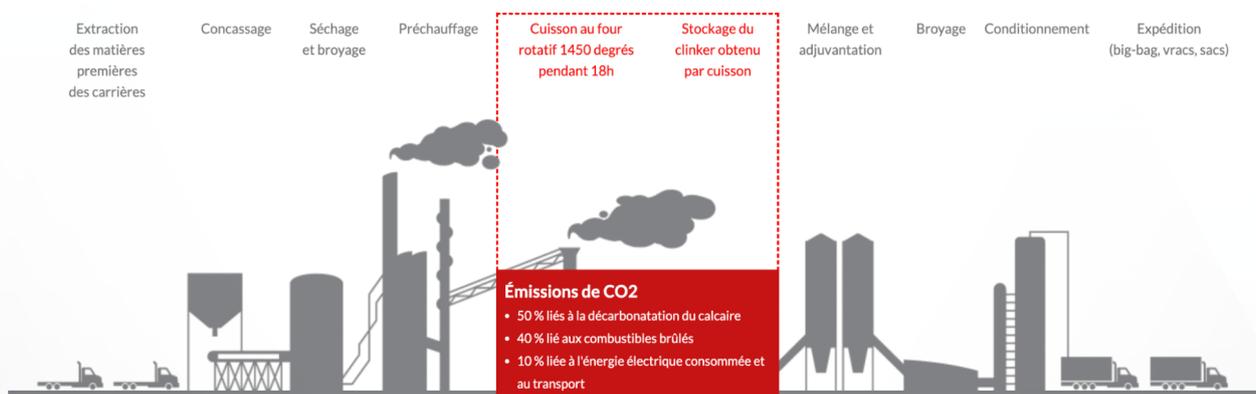


Figure 1 : Mode de fabrication du béton traditionnel Portland - Source: Hoffmann Green.

## Comment est fabriqué le ciment Hoffmann Green ?

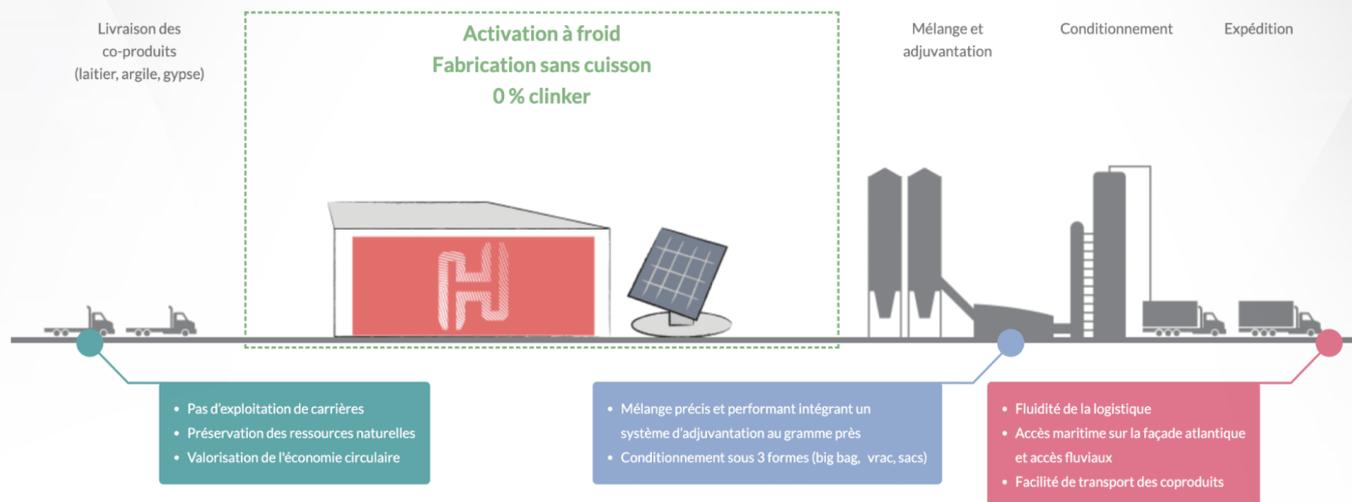


Figure 2 : Fabrication de ciment à froid (Source Hoffmann Green).

La recherche dans le domaine des ciments bas-carbone est donc une nécessité – et une formidable opportunité – pour des constructions moins émettrices de gaz à effet de serre. Le béton bas carbone se compose de ciment industriel additionné de composés minéraux, comme l'argile calcinée, les cendres volantes ou les laitiers de hauts fourneaux. Suivant le dosage de ces additions, il est possible d'atteindre des réductions de l'empreinte carbone des bétons de près de 70 %.

Comme l'impact carbone du béton traditionnel relève en grande partie de la clinkérisation, des cimentiers tels que Hoffmann Green Cement proposent d'activer la matière à froid par des interactions chimiques entre les matériaux grâce à des activateurs spécifiques. Le ciment est fabriqué sans cuisson et donc sans clinkérisation (figure 2). Dans la même perspective de réduction de son empreinte, le site de production sans four ni cheminée ne produit pas de déchets.

Les matériaux utilisés sont des coproduits issus d'autres industries : argile métakaolin, gypse, laitiers de hauts-fourneaux et métasilicate de sodium.

### Plusieurs start-up développent des matériaux de construction novateurs, avec comme objectif de décarboner l'industrie du ciment

En Europe, Hoffmann Green Cement Technologies a mis au point des ciments fortement décarbonés avec un processus de production qui divise par cinq l'empreinte carbone par rapport à des ciments traditionnels. Des start-up industrielles cherchent également à réduire le taux de carbone dans la fabrication du ciment, comme Greenmade, qui développe un liant hydraulique, ou Materrup qui produit un ciment à base d'argile non calcinée - donc faible en consommation d'énergie.

Aux Etats Unis, des start-up, telles que Brimstone, s'attaquent également à ce problème. Au lieu d'utiliser du calcaire, l'entreprise utilise du silicate de calcium. C'est l'une des roches les plus abondantes sur la terre qui contient tout ce qu'il faut pour faire du ciment, mais pas de CO<sub>2</sub>.

Le processus de fabrication produit du magnésium, qui absorbe du CO<sub>2</sub>. Les fondateurs de Brimstone vantent un matériel « négatif en carbone ». Ce qui ne signifie pas pour autant que leur ciment soit entièrement décarboné, à cause de l'énergie utilisée pour la fabrication.

### L'enjeu des certifications

Au-delà des délais de contractualisation souvent élevés, les start-up doivent passer par la case certification et avis technique auprès du CSTC (le centre d'innovation du secteur de la construction) avant de pouvoir commercialiser leurs produits dans le cadre de constructions neuves ou de rénovations. Une avalanche de certifications, longues à obtenir et coûteuses pour une jeune société.

En effet, l'étape la plus longue et complexe reste celle de la mise sur le marché de ces nouvelles formules de ciment bas-carbone qui nécessite des démarches administratives pouvant s'étendre sur une décennie. Actuellement, des questions se posent sur l'assurabilité de ces nouveaux ciments, dont la composition diffère considérablement de celle des ciments conventionnels, alors que les normes actuelles se basent sur la composition plutôt que sur la performance des ciments. Par conséquent, le rythme de normalisation des ciments semble difficilement compatible avec les échéances auxquelles l'industrie doit réduire ses émissions. ■ SD

## L'anomalie du moment magnétique du muon

### Une épine dans le pied du modèle standard de la physique des particules



Vue du dessus des aimants géants utilisés dans l'expérience du Fermilab. Source : Fermilab.

**Le modèle standard des particules élémentaires est une théorie qui décrit les constituants élémentaires de la matière ainsi que les lois qui régissent leurs interactions. C'est une construction intellectuelle qui se doit d'être vérifiée expérimentalement dans tous ses aspects et propriétés. Quand la mesure d'une grandeur caractéristique d'un constituant ne correspond pas complètement à la valeur que prédit la théorie, on dit alors qu'il y a une anomalie. Depuis les années 60, le moment magnétique du muon présente une anomalie persistante à mesure que les expérimentations se font de plus en plus précises.**

### Rappel des caractéristiques du modèle standard

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, la découverte des premiers constituants élémentaires de la matière persuade les physiciens que la matière n'est pas divisible à l'infini et qu'il existe dans celle-ci des constituants élémentaires. La découverte de l'électron, la radioactivité, la théorie de l'atome de Rutherford puis celle de Bohr contribuent à échafauder les premiers modèles de la physique des particules. Dans les années 1920, la physique quantique va donner une assise théorique à ces recherches.

Les années 1930 voient le champ jusque là réduit des particules élémentaires s'élargir avec la découverte du neutron puis celle théorique des neutrinos pour devenir pléthorique avec les particules détectées dans les rayons cosmiques. Les chercheurs ont alors commencé à faire la taxonomie des particules et des forces qui les régissaient. Les premiers modèles ont été établis pour l'électromagnétisme qui régissait les *forces électromagnétiques*. Les découvertes de la structure du noyau de l'atome ont mis en évidence

|          | fermions<br>(3 générations de la matière) |                                |                                | bosons<br>(forces)            |
|----------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|          | I   | II                             | III                            |                               |
| masse →  | 2.4 MeV                                   | 1.27 GeV                       | 171.2 GeV                      | 0                             |
| charge → | $\frac{2}{3}$                             | $\frac{2}{3}$                  | $\frac{2}{3}$                  | 0                             |
| spin →   | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                  | $\frac{1}{2}$                  | 1                             |
| nom →    | u<br>up                                   | c<br>charm                     | t<br>top                       | $\gamma$<br>photon            |
|          |   |                                |                                | interaction électromagnétique |
|          | 4.8 MeV                                   | 104 MeV                        | 4.2 GeV                        | 0                             |
|          | $-\frac{1}{3}$                            | $-\frac{1}{3}$                 | $-\frac{1}{3}$                 | 0                             |
|          | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                  | $\frac{1}{2}$                  | 1                             |
| Quarks   | d<br>down                                 | s<br>strange                   | b<br>bottom                    | g<br>gluon                    |
|          |   |                                |                                | interaction forte             |
|          | <2.2 eV                                   | <0.17 MeV                      | <15.5 MeV                      | 91.2 GeV                      |
|          | 0   | 0                              | 0                              | 0                             |
|          | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                  | $\frac{1}{2}$                  | 1                             |
| Leptons  | $\nu_e$<br>neutrino électronique          | $\nu_\mu$<br>neutrino muonique | $\nu_\tau$<br>neutrino tauique | $Z^0$<br>boson Z <sup>0</sup> |
|          |   |                                |                                | interaction faible            |
|          | 0.511 MeV                                 | 105.7 MeV                      | 1.777 GeV                      | 80.4 GeV                      |
|          | -1  | -1                             | -1                             | +1                            |
|          | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                  | $\frac{1}{2}$                  | 1                             |
|          | e<br>électron                             | $\mu$<br>muon                  | $\tau$<br>tau                  | $W^\pm$<br>boson W            |
|          |   |                                |                                | interaction forte             |

Figure 1 : Les particules du modèle standard. Le tableau s'est rempli graduellement au fur et à mesure des vérifications expérimentales.

une autre force différente appelée *l'interaction forte* puis les phénomènes de radioactivité ont révélé *l'interaction faible*. Ces trois types d'interactions ont défini par leurs propriétés des familles de constituants plus ou moins élémentaires et les chercheurs ont travaillé durant des décennies à unifier dans un modèle unique l'ensemble de ces trois interactions pour élaborer le modèle standard de la physique des particules. La validation de ce modèle qui devait satisfaire aux critères de falsification de Popper, a résisté jusqu'à présent à pratiquement toutes les vérifications expérimentales à l'exception de certaines qui font l'objet de cet article. Le modèle standard est réputé aujourd'hui comme très solide mais beaucoup de physiciens, face à certaines anomalies, cherchent d'autres modèles plus avancés dans le cadre d'une nouvelle physique dont les contours sont encore mal définis.

### Le muon : « mais qui a commandé cela ? »

Les particules sensibles à l'interaction faible forment la famille des leptons. Historiquement le premier de cette famille est l'électron noté e<sup>-</sup> découvert expérimentalement en 1897. Il possède une charge électrique qui lui confère les propriétés de l'interaction électromagnétique et des liaisons chimiques et il est sensible à l'interaction faible. Une théorie quantique de l'électron a été élaborée par Paul Dirac en 1927 avec son équation éponyme qui lui a permis de calculer théoriquement son moment magnétique.

Un autre lepton, le muon noté  $\mu^-$ , a été découvert par Anderson et Nedermeyer en 1938 dans les rayons cosmiques. Cette découverte marquait le début d'une série de particules qui semblaient exotiques voire inutiles à tel point que le physicien Isidore Rabi énonça cette phrase « mais qui a commandé cela ? » pour manifester sa surprise devant le muon, gros électron instable sans utilité particulière. Plus tard au début des années 60, on a associé aux

muons un neutrino spécifique comme il existe un neutrino associé à l'électron, toutes ces particules ayant des opposés de charge d'antimatière.

En 1975 un troisième lepton chargé, appelé tau et noté  $\tau^-$ , a été découvert à l'université de Stanford au cours d'expériences utilisant des faisceaux d'électrons et de positrons envoyés à l'encontre l'un de l'autre. Le muon semble identique à l'électron à l'exception notable de sa masse puisqu'elle est 200 fois plus grande que celle de l'électron. En réalité le muon s'est révélé être utile car le modèle standard est basé sur des lois de symétrie et son élaboration a consisté à remplir peu à peu un tableau de particules (figure 1) dont certaines validations expérimentales n'ont été effectives que récemment avec la détection du boson de Higgs.

## La saga du moment magnétique de l'électron et du muon

Quand Paul Dirac a réussi à trouver une version relativiste de l'équation de Schrödinger qu'on a appelée équation de Dirac, cette dernière est apparue très riche et un nouveau monde est apparu avec l'antimatière. Pour mettre au point son équation, Dirac a introduit une dimension qui n'était pas dans l'équation de Schrödinger, le *spin*, déjà découvert expérimentalement par Samuel Goudsmit et George Uhlenbeck, mais qu'on n'avait pas, jusque-là, réussi à faire entrer dans le modèle théorique. Le *spin* a la dimension d'un moment magnétique et, dès 1928, Dirac établit la constante  $g^1$  de proportionnalité entre la magnétisation de l'électron et son *spin* et trouva qu'il était égal à 2 ce qui dans un premier temps était complètement confirmé expérimentalement.

Dans les décennies qui ont suivi, les mesures ont conforté cette valeur jusqu'en 1947 où une mesure plus précise a montré une valeur légèrement différente, plus élevée d'un millième. Les physiciens ont intégré cette anomalie et ce sont les fondateurs de la théorie quantique des champs ou électrodynamique quantique (QED) qui ont donné une explication à cet écart, liée aux fluctuations quantiques et à l'interaction de photons virtuels créés et annihilés autour de l'électron. Le muon avait lui aussi un moment magnétique qui devait obéir aux mêmes lois, le facteur  $g$  calculé par l'équation de Dirac était aussi égal à 2 mais il est apparu assez vite que sa masse beaucoup plus élevée impliquait des énergies en jeu plus élevées et compliquait considérablement le calcul des perturbations des photons virtuels et qu'il fallait inclure aussi les bosons intermédiaires des interactions faibles. Des expériences se sont succédées dans les années 60 qui semblaient être conformes aux nouveaux calculs, mais en 2001 avec l'expérience de Brookhaven (dans le Maine aux USA), les physiciens obtinrent une valeur significativement différente des calculs ce qui posait un problème de validité du modèle standard.

<sup>1</sup>  $g$  est le facteur de Landé sans dimension qui est le rapport du moment magnétique et du moment cinétique.

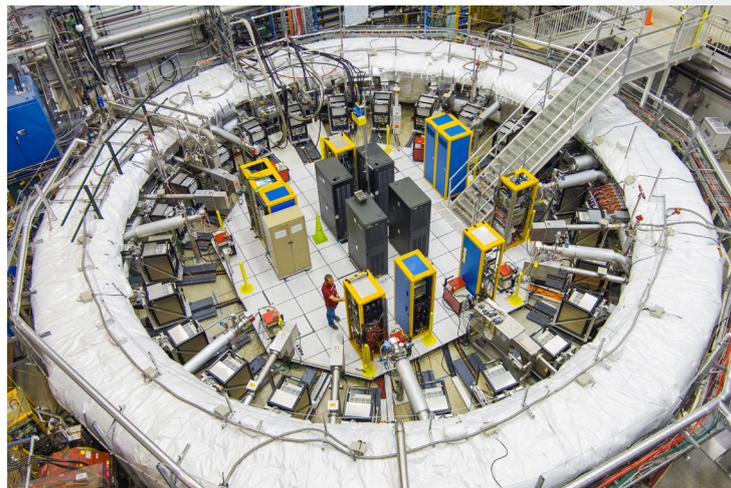


Figure 2 : Anneau de l'expérience g-2 de mesure du moment magnétique du muon au Fermilab de Chicago. Source : Fermilab.

## Les expériences au Fermilab de Chicago

En 2013, l'aimant de 700 tonnes en forme d'anneau (figure 2) qui était le cœur de l'expérience de Brookhaven, déménagea par bateau et par camion pour être installé au Fermilab de Chicago afin de bénéficier d'un faisceau de muons plus pur et plus intense. Les expériences commencèrent en 2018 et se poursuivent encore aujourd'hui. Le principe de l'expérience repose sur un anneau entouré par un champ magnétique vertical (figure 3). Les muons sont injectés dans l'anneau et effectuent un certain nombre de tours. Le muon est instable et quand il se désintègre, son moment magnétique est mesuré. Or quand les muons sont injectés, leurs moments magnétiques sont alignés dans le sens de leur mouvement. Le moment magnétique suit un mouvement de précession qui le fait tourner dans l'anneau et si  $g$  est égale à 2 après un tour de l'anneau, il redevient aligné. Si ce n'est pas le cas à chaque tour il y a un désalignement entre le moment magnétique et le vecteur vitesse. Au moment de la désintégration du muon en un électron, le *spin* de ce dernier est mesuré ce qui permet de connaître la direction dans laquelle pointait le *spin* du muon. Les expériences depuis 2018 se sont poursuivies et une dernière série de mesures publiées en septembre 2023 avec une précision deux fois meilleure qu'en 2021 a bien confirmé l'anomalie.

## Les hypothèses sur le modèle standard

La situation est ouverte car il y a deux voies qui permettent d'envisager une explication de cette anomalie. La première consiste à penser que ce qui était arrivé avec le moment magnétique de l'électron résolu par la QED pourrait se reproduire avec le muon en y incluant, à cause de sa masse, les théories électro-faibles avec l'influence des hadrons dans les perturbations du moment magnétique. Cette voie serait celle d'une amélioration locale de la théorie qui n'aurait pas de conséquence sur l'ensemble du modèle standard. Dans cette voie, en 2021, une

## LIFE OF A MUON: THE g-2 EXPERIMENT

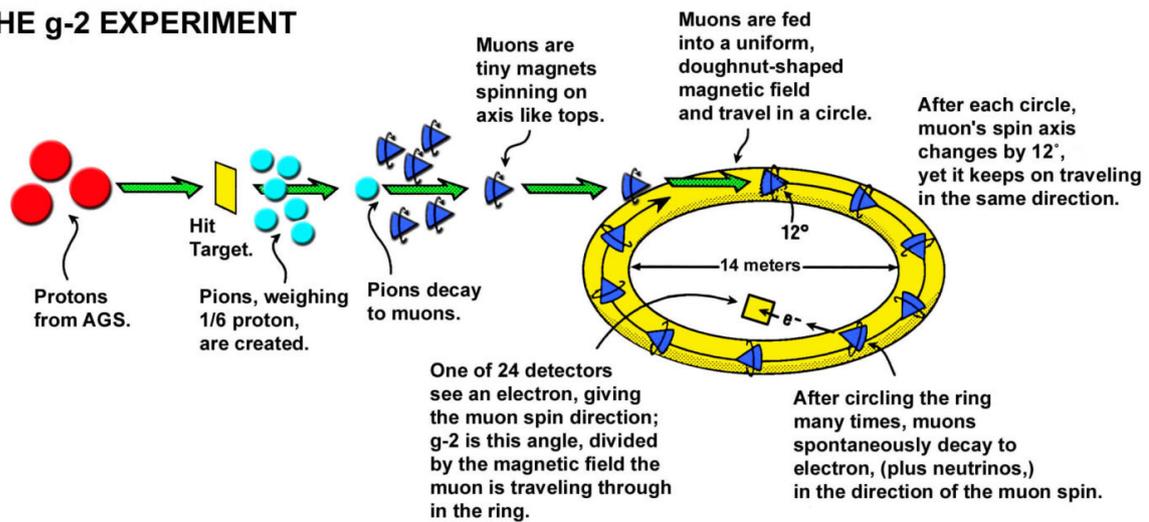


Figure 3 : Principe de l'expérience g-2 et de la génération de flux de muons dans l'anneau du Fermilab. Source : Fermilab.

- équipe de théoriciens connue sous l'appellation « collaboration Budapest-Marseille-Wuppertal », a développé une nouvelle approche grâce à une méthode appelée chromodynamique quantique sur réseau qui inclut les particules virtuelles comme les quarks et les gluons. Ce modèle théorique s'approche davantage de la valeur mesurée que de la dernière valeur théorique utilisée jusqu'à présent.

La deuxième voie, défendue par quelques physiciens, consiste à penser qu'il manque quelque chose au modèle standard et ces derniers plaident pour l'élaboration d'une nouvelle physique au-delà du modèle standard qui au regard des expériences récentes du LHC montre des signes de faiblesse. La situation est donc complètement ouverte et les années à venir devraient éclairer ce débat. ■ ML

## ➤ Ariane 6 sur le fil

### Une longue absence

Le dernier tir d'Ariane 5 a été effectué depuis le port spatial de Kourou, en octobre 2018, chargé de la mission BepiColombo. Dans les faits, un autre vol a été effectué en juin 2018, mais c'était le report d'un tir prévu en février 2018. Et depuis, il n'a plus été procédé à aucun lancement d'Ariane.

Après des tests techniques réussis menés au Centre spatial guyanais et au Centre technique de Lampoldshausen en Allemagne, l'Agence spatiale européenne envisage le premier vol du nouveau lanceur européen Ariane 6 aux environs de l'été 2024. Malgré un retard de plus trois ans, la montée en cadence est très progressive. La chaîne de production d'Ariane 6 a été

conçue pour produire entre 9 et 12 lanceurs par an, mais il faudrait plusieurs années avant d'atteindre cette cadence de production. Arianespace dispose déjà d'un carnet de commandes de 28 lancements dont 18 pour la seule constellation de satellites de télécommunications Kuiper du groupe Amazon.

Cette longue absence est due à plusieurs facteurs dont on retiendra surtout une mauvaise entente entre les pays membres du consortium et l'avancée du plus important concurrent qui est Space X. Pour être compétitive face à ses concurrents, Ariane 6 bénéficie d'un soutien public massif. Réunis en Conseil européen à Séville en novembre 2023, les états membres de l'ESA ont voté une aide de 340 millions d'euros par an pour équilibrer les comptes d'exploitation du lanceur.

### Un tout nouveau concept

Avec Ariane 6, le lanceur se conjugue en deux versions : Ariane 62 et Ariane 64, et se dote d'un étage supérieur avec un moteur réallumable. Cette innovation produira une grande flexibilité dans les capacités de placement sur orbite et une réduction significative du coût d'utilisation. En effet, il sera possible de placer plusieurs missions sur des orbites différentes à partir du même lancement.

Avec ses quatre boosters, Ariane 64 se place dans la succession d'Ariane 5 avec la possibilité de charge de deux satellites de télécommunication en orbite de transfert géostationnaire ou l'envoi de nombreux satellites pour les grandes constellations. Dotée de deux boosters, Ariane 62 assurera principalement le lancement de satellites scientifiques, des satellites de positionnement Galileo et d'observation de la Terre en orbite basse ou moyenne. Ce lanceur sera par ailleurs capable de placer un satellite lourd unique en orbite géostationnaire.



Figure 1 : Ariane 6 en tests. Crédits : CNES/ESA/Arianespace-ArianeGroupe/CSG

Ces deux versions sont équipées au niveau de leur étage supérieur d'un nouveau moteur, appelé Vinci. Il est capable de se ré-allumer, offrant ainsi une grande liberté pour envoyer un ou plusieurs satellites sur des orbites différentes. Ariane 6 est également pourvue de nouveaux boosters, appelés P120C, et d'une nouvelle version du moteur Vulcain 2, dite 2.1. Des innovations technologiques ont été introduites telle la fabrication par impression 3D, et un procédé de soudage de ses réservoirs par friction malaxage.

### Sommet spatial de Séville : un redémarrage en force

Les 6 et 7 novembre 2023 à Séville, les 22 Etats membres de l'ESA se sont accordés sur l'avenir de l'Europe spatiale. Trois axes principaux sont retenus: le climat, l'exploration et les lanceurs. La France, l'Allemagne et l'Italie comptent parmi les trois plus gros contributeurs au budget spatial européen.

Dans le domaine de l'exploration, l'Europe a affiché son ambition dans le cadre d'une plus grande autonomie pour l'exploration robotique et humaine. En mettant en compétition des entreprises européennes innovantes, l'Europe amorce une toute nouvelle approche de sous-traitance de services à

des acteurs privés du spatial. L'objectif est de faire émerger des leaders industriels pour consolider le futur de l'exploration spatiale européenne.

En ce qui concerne les lanceurs, l'Europe est parvenue à un accord majeur pour assurer le futur des lanceurs Ariane 6 et Vega-C, essentiels pour l'accès autonome de l'Europe à l'espace. Cet accord prévoit un financement public de 340 millions d'euros par an pour Ariane 6, à partir du 16<sup>ème</sup> vol jusqu'au au 42<sup>ème</sup> vol, soit de 2026 à 2030. Dans le même temps, l'industrie, et en premier lieu ArianeGroup, s'est engagée à réduire ses coûts. Quant à Vega-C, la subvention, si elle est nécessaire, pourrait aller jusqu'à 21 millions d'euros annuels, également du 26<sup>ème</sup> au 42<sup>ème</sup> vol. Au-delà d'Ariane 6, le futur des lanceurs commence également à se préciser avec une décision forte qui consiste en un changement de modèle qui permettra l'émergence de la génération suivante de lanceurs. L'Europe s'engage vers la mise en concurrence d'acteurs privés européens, afin de développer les lanceurs les plus compétitifs dans les années à venir. Enfin, Avio, constructeur italien de Vega-C, va commercialiser lui-même ses vols, jusqu'à présent exploités par Arianespace.

### Préparation du premier vol

Le 23 novembre 2023, les équipes d'ArianeGroup, du Centre national d'études spatiales (CNES) et de l'Agence spatiale européenne (ESA) ont réalisé avec succès l'essai à feu de longue durée de l'étage principal d'Ariane 6 sur son pas de tir, au Centre spatial guyanais. Ce nouvel essai complet de l'étage principal d'Ariane 6 est une étape majeure de la campagne des essais combinés. Cette séquence d'essais s'est déroulée comme les précédentes, dans un scénario complet, incluant le retrait du portique mobile ainsi que le remplissage en hydrogène liquide (-253° C) et en oxygène liquide (-183° C) des réservoirs de l'étage principal et de l'étage supérieur du lanceur. Elle s'est terminée cette fois-ci par l'allumage du moteur Vulcain 2.1 de l'étage principal fournissant ●●●



Figure 2 : Ariane 6 en test complet sur le pas de tir.



Figure 3 : Essai du moteur Vulcain 2.1. Crédits : CNES/ESA/Arianespace-Arianespace/CSG.

- ses 135 tonnes de poussée, suivi de plus de 7 minutes de fonctionnement stabilisé correspondant à l'intégralité de la phase de vol.

Ce premier test complet au sol s'inscrit dans la continuité de la première intégration du lanceur Ariane 6 sur son pas de tir, des essais de qualification fonctionnels et enfin des premiers tests de lancement. Ces essais se sont déroulés avec succès le 18 juillet 2023 pour la toute première séquence de préparation, remplissage et vidange, et le 5 septembre avec un allumage et un fonctionnement stabilisé du moteur Vulcain 2.1 de l'étage principal pendant 4 secondes.

Le 7 décembre 2023, il a été procédé à un essai de mise à feu de l'étage supérieur à Lampoldshausen. Déjà qualifié pour le vol après des essais rigoureux dans des conditions



Figure 4 : Le transporteur « Canopée » en Guyane française. Crédits : CNES/ESA/Arianespace-Arianespace/CSG.

nominales, les limites de l'étage supérieur d'Ariane 6 ont été testées. Cet essai de mise à feu avait pour objectif de reproduire un début de vol nominal avec le moteur Vinci et le groupe auxiliaire de puissance redémarrable, puis d'introduire des conditions dégradées afin d'évaluer la robustesse de l'étage et son comportement dans des conditions extrêmes et inattendues.

### Une croisière sur l'Atlantique

Les éléments du lanceur d'Ariane 6 seront transportés par un nouveau vaisseau appelé Canopée jusqu'au port spatial de l'Europe en Guyane française. Ce navire est le premier transporteur construit sur mesure à utiliser des voiles, ce qui permet de réduire les émissions et d'économiser jusqu'à 30 % de carburant. Le cargo de nouvelle génération a été conçu pour ArianeGroup afin de répondre aux exigences complexes du transport d'Ariane 6. Les étages et les moteurs sont des équipements de haute technologie qui nécessitent des précautions spéciales pendant le transport. Le navire à propulsion hybride mesure 121 m de long et possède des voiles de 37 m de haut. Canopée effectuera des rotations continues entre cinq escales pour charger les étages et sous-ensembles d'Ariane 6 et les expédier à travers l'océan Atlantique jusqu'au port spatial européen. Après avoir récupéré l'étage supérieur à Brême, en Allemagne, Canopée fait escale à Rotterdam pour charger la coiffe du lanceur, avant de se rendre au Havre pour charger l'étage central d'Ariane 6. La dernière étape avant la traversée de l'Atlantique est le port de Bordeaux qui rassemble des éléments de propulsion solides.

La traversée transatlantique de 10 jours s'achève dans le port de Pariacabo, dans la province de Kourou, en Guyane française. De là, les différents composants d'Ariane 6 sont déchargés et transportés par la route jusqu'au nouveau bâtiment d'assemblage situé à quelques kilomètres.

### Ultimes étapes

Fin janvier 2024 sont prévus les tests de déconnexion du système de bras cryogéniques. Il s'agit d'une répétition de la déconnexion des bras inférieurs et supérieurs de ravitaillement qui soutiennent les ombilicaux alimentant Ariane 6 en propergol cryogénique d'appoint. Vers le milieu du mois de février 2024, les premiers composants de vol arriveront en Guyane française. Les étages du vol inaugural d'Ariane 6 arriveront par le navire Canopée au port de Kourou.

L'ESA, le CNES et ArianeGroup prévoient une date comprise entre mi-juin et fin juillet 2024 pour le vol inaugural d'Ariane 6.

Rendez-vous donc en juin-juillet prochain avec une forme olympique. ■ AD