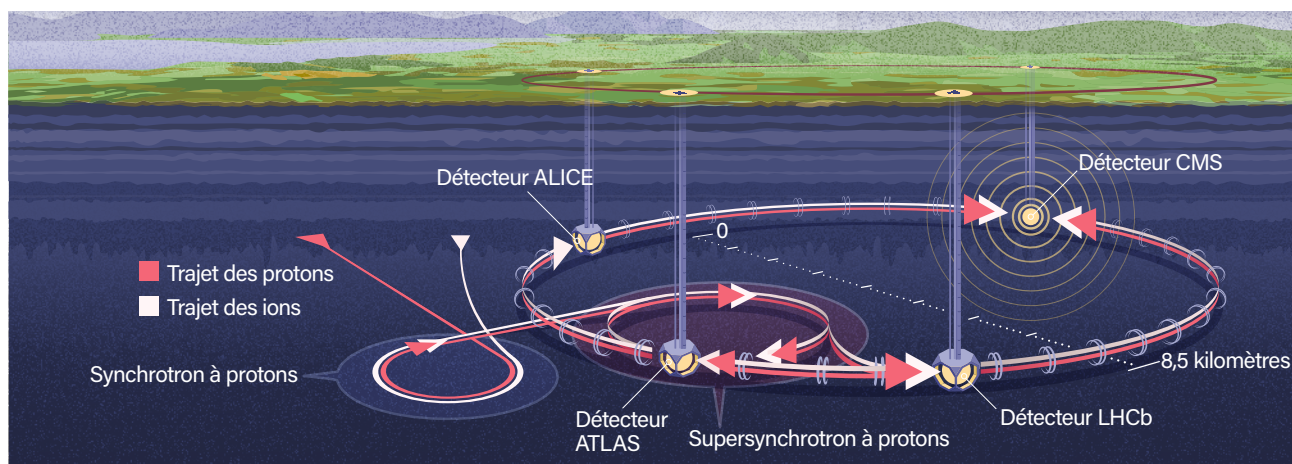


COLLISIONNEURS: VERS UNE NOUVELLE GÉNÉRATION

Les collisionneurs en exercice utilisent des ondes électromagnétiques pour créer des champs électriques capables d'accélérer des faisceaux de particules chargées et de guider leur collision.

S'il fait figure de plus grosse machine jamais construite, et bien qu'il ait conduit avec succès la chasse au boson de Higgs, le LHC atteindra sans doute ses limites d'ici à 2035. Pour progresser,

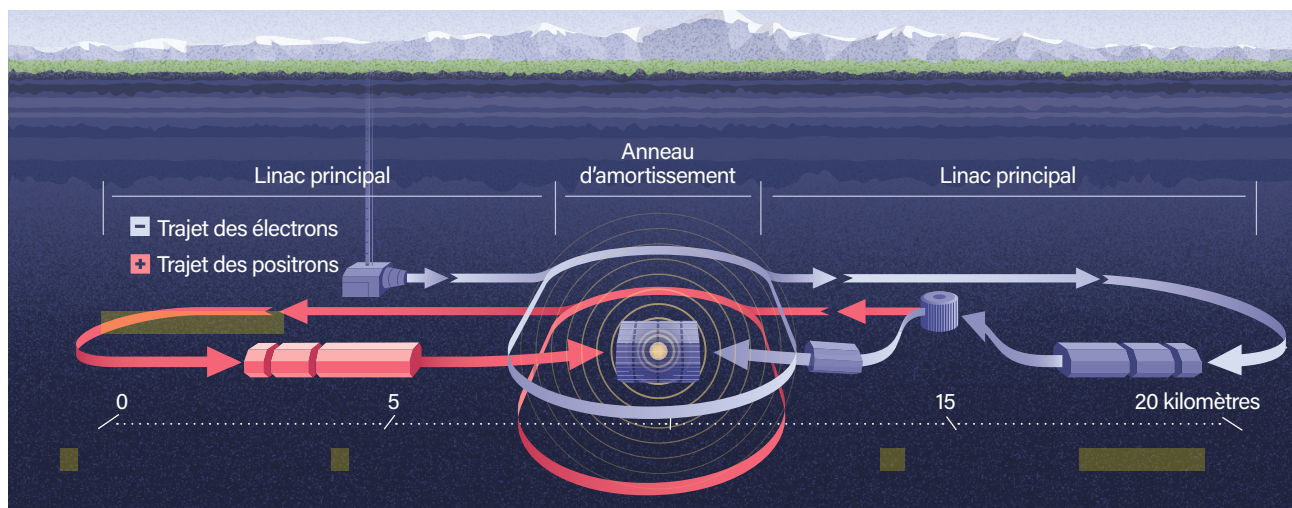
la physique des particules aura besoin de nouveaux appareils, plus puissants et, idéalement, moins coûteux. Piste prometteuse: celle des accélérateurs à plasma.



84

LHC: un géant tout en courbes

Le Grand collisionneur de hadrons (Large Hadron Collider, ou LHC) héberge dans son anneau de 27 kilomètres de circonférence, enterré sous la frontière franco-suisse, des collisions entre protons à une énergie de 14 TeV. Les protons sont accélérés par des passages successifs dans des synchrotrons. Plus rarement, on y télescope aussi des ions de plomb.

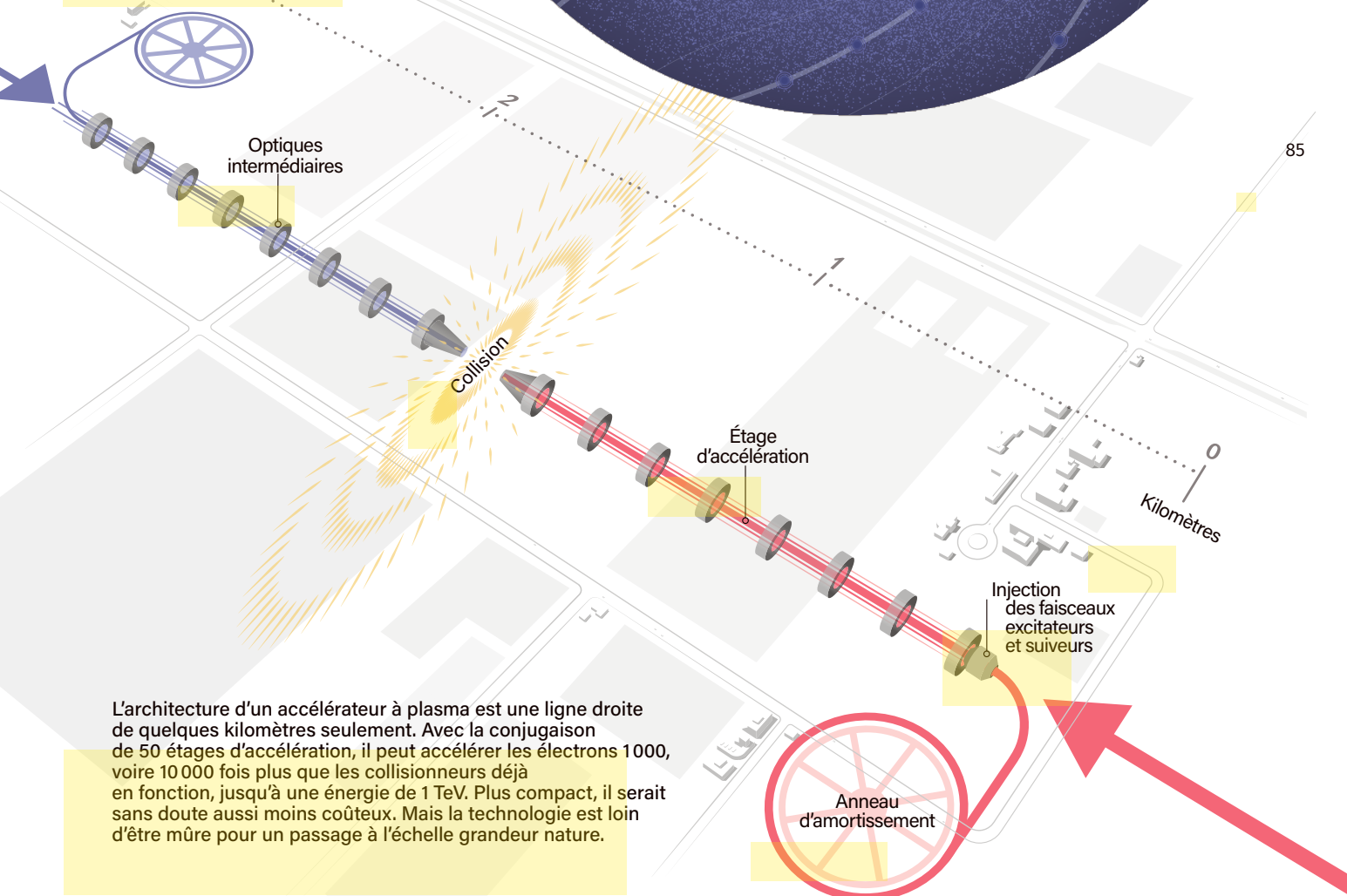
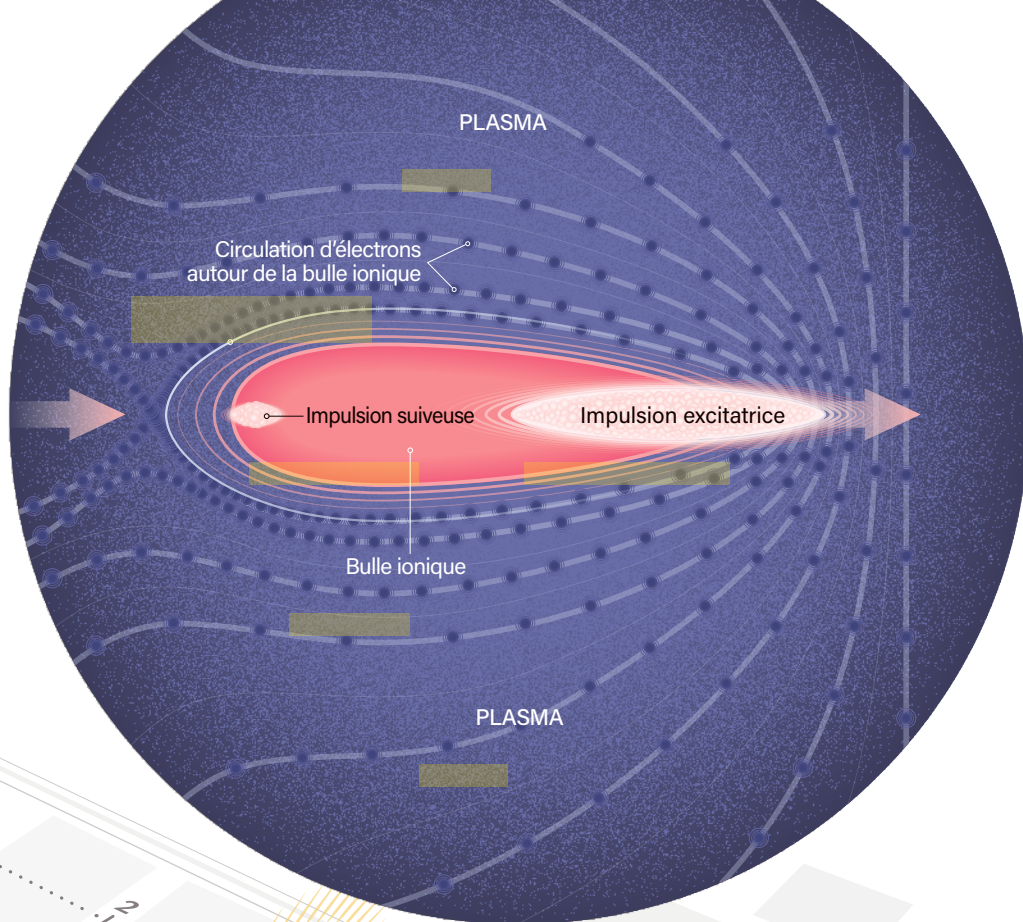


ILC: un successeur droit dans ses bottes

Héritier possible du LHC au Cern, l'Accélérateur linéaire international (International Linear Collider, ou ILC) entrechoquera des électrons avec des positrons. Pour éviter les courbes qui font perdre de l'énergie aux particules chargées, il sera de conception linéaire. Selon certaines estimations, son coût pourrait être le double de celui du LHC.

L'accélérateur à plasma avec faisceau d'électrons

À l'intérieur d'un plasma, un premier faisceau d'électrons exciteur repousse les électrons environnants. Une bulle ionique, concentrant des ions chargés positivement, se forme dans le sillage; elle attire vers l'arrière les électrons chargés négativement. Emportés par leur vitesse, ces électrons vont trop loin, et sont réattirés par la bulle. Un champ électrique oscillant apparaît dans le sillage. Il est en capacité d'accélérer un second faisceau «suiveur» synchronisé.



L'architecture d'un accélérateur à plasma est une ligne droite de quelques kilomètres seulement. Avec la conjugaison de 50 étages d'accélération, il peut accélérer les électrons 1000, voire 10 000 fois plus que les collisionneurs déjà en fonction, jusqu'à une énergie de 1 TeV. Plus compact, il serait sans doute aussi moins coûteux. Mais la technologie est loin d'être mûre pour un passage à l'échelle grandeur nature.

L'avenir des accélérateurs à plasma est incertain, mais d'ici à une décennie, construire une machine de 10 GeV semble possible

manière que le circuit intégré a miniaturisé l'électronique à partir des années 1960. Détaillons un peu le concept.

Les trois premiers états de la matière sont bien connus : solide, liquide et gazeux. Le plasma est souvent nommé le « quatrième état ». Bien que relativement rare dans notre quotidien, c'est le plus commun dans l'Univers. Selon certaines estimations, plus de 99 % de toute la matière visible dans le cosmos est à l'état plasmique – les étoiles, par exemple, en sont constituées. Fondamentalement, un plasma est un gaz ionisé avec une densité égale d'électrons et d'ions. Les scientifiques forment aisément des plasmas en laboratoire, en diffusant de l'électricité à travers un gaz comme dans un tube fluorescent ordinaire.

Employons une analogie nautique. Lorsqu'un bateau avance, il déplace de l'eau qui s'écarte à l'arrière du vaisseau pour former un sillage. De manière similaire, dans un accélérateur à plasma, une impulsion laser très concentrée et ultra-intense, se déplaçant à travers un plasma à la vitesse de la lumière, peut créer un champ de sillage relativiste, c'est-à-dire qui se propage lui aussi presque à la vitesse de la lumière, en exerçant une pression de radiation et en déplaçant les électrons du plasma sur sa trajectoire. Si, au lieu d'une impulsion laser, un paquet d'électrons exciteur à haute énergie est envoyé à travers le plasma, la charge négative de ces particules peut repousser tous les autres électrons du plasma (*voir l'illustration page précédente*). Les ions les plus lourds, chargés positivement, demeureront immobiles. Après le passage de l'impulsion, les électrons éjectés, chargés négativement, sont réattirés vers les ions positifs. Les électrons se déplacent si vite qu'ils dépassent les ions et

subissent encore une fois une attraction vers l'arrière, ce qui fait osciller le sillage. En raison de la séparation des électrons et des ions du plasma, un champ électrique se forme à l'intérieur de ce sillage.

Si un deuxième paquet d'électrons « suiveur » est placé derrière la première impulsion excitatrice, ses électrons peuvent acquérir de l'énergie dans le champ de sillage de la même façon qu'un paquet d'électrons est accéléré par les ondes radio dans un accélérateur classique. Une quantité suffisante d'électrons suiveurs absorberaient même assez d'énergie pour que le champ électrique s'en retrouve amorti. Dès lors, tous les électrons du paquet suiveur profiteraient d'un champ accélérateur constant et obtiendraient le même gain d'énergie, ce qui réduirait la dispersion d'énergie du faisceau.

L'AVENIR DU PLASMA

L'avantage principal d'un accélérateur à plasma par rapport à d'autres procédés, c'est que les champs électriques dans le sillage peuvent aisément être 1 000 fois plus forts que ceux des cavités à radiofréquence traditionnelles. De plus, une fraction très significative de l'énergie que le faisceau exciteur transfère au sillage peut être extraite par le paquet suiveur. Ces effets font potentiellement du collisionneur à plasma un appareil à la fois plus compact et moins coûteux que les collisionneurs traditionnels.

Les accélérateurs à plasma, qu'ils soient à base de laser ou de faisceaux d'électrons, ont tous deux énormément progressé ces deux dernières décennies. Ma propre équipe, à

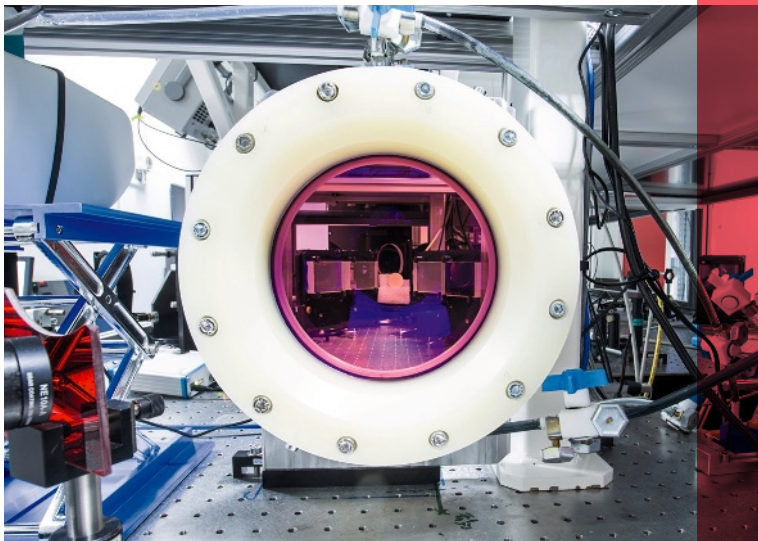
l'université de Californie, à Los Angeles, a réalisé des expériences pilotes avec des physiciens du Laboratoire national de l'accélérateur SLAC, sur leur site de Menlo Park, en Californie. Nous avons injecté des électrons excitateurs et suiveurs avec une énergie initiale de 20 GeV et avons trouvé que les électrons suiveurs gagnaient en énergie jusqu'à 9 GeV après avoir traversé un plasma de 1,3 mètre de longueur. Nous avons aussi obtenu un gain de 4 GeV pour un paquet de positrons en n'utilisant qu'un plasma de 1 mètre dans une expérience de validation de concept. Plusieurs autres laboratoires dans le monde ont aussi utilisé des champs de

sillage créés par laser pour produire des gains d'énergie dans des paquets d'électrons à hauteur de plusieurs GeV.

L'objectif final des spécialistes de l'accélération à plasma est de créer un accélérateur linéaire qui provoque la collision de faisceaux très intenses d'électrons et de positrons, ou seulement d'électrons, avec une énergie totale excédant 1 TeV. Pour accomplir cet exploit, nous aurions besoin de connecter environ 50 étages d'accélération à plasma en série, chaque étage fournissant une énergie de 10 GeV.

Mais l'alignement et la synchronisation des faisceaux excitateurs et suiveurs à travers tant

87



← Un programme de recherche sur l'accélérateur à plasma du futur financé par l'Union européenne à hauteur de 3 millions d'euros a mobilisé 41 instituts de recherche (dont le CEA, le synchrotron Soleil et le CNRS, avec son puissant laser Apollon, *en photo*) entre 2015 et 2019. Son nom : Eupraxia, pour European Plasma Research Accelerator with Excellence in Applications. Un démonstrateur européen pourrait ainsi voir le jour dans la prochaine décennie, mais à des énergies très insuffisantes pour les besoins de la physique des particules.

d'étages d'accélération à plasma pour obtenir une collision avec la précision désirée est un défi énorme. Le rayon typique du sillage est inférieur à 1 millimètre, et les scientifiques doivent injecter le paquet d'électrons suiveurs avec une précision submicronique. Ils doivent aussi synchroniser l'impulsion excitatrice et le faisceau suiveur avec moins de 1 centième de billionième de seconde de décalage. Toute erreur d'alignement conduirait à une baisse de la qualité du faisceau et une perte en énergie et en charge causée par l'oscillation des électrons autour de l'axe du sillage de plasma. Cette perte se traduit par une émission de rayons X durs, connue sous le nom d'«émission bêta-tron», et place une limite finie à la quantité d'énergie que l'on peut obtenir grâce à un accélérateur à plasma.

BEAUCOUP DE PERTES D'ÉNERGIE EN PRÉVISION

D'autres difficultés techniques freinent la concrétisation. Par exemple, le premier atout d'un collisionneur de particules est sa luminosité – une mesure de la quantité de particules passant à travers un espace donné en un temps donné. La luminosité multipliée par la section efficace – ou par la probabilité que deux particules se percutent – indique combien de collisions d'une nature particulière par seconde vous pourrez probablement observer à un niveau d'énergie donné. La luminosité voulue pour un collisionneur linéaire électron-positron à 1 TeV est de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. L'atteindre nécessiterait que les faisceaux qui se percutent aient une puissance moyenne de 20 mégawatts chacun – 10^{10} particules par paquet à un taux de répétition de 10 kilohertz et une taille de faisceau au point de collision de 1 dixième de milliardième de mètre. Pour illustrer le défi que cela représente, concentrons-nous sur le besoin de puissance moyen. Même si vous pouviez transférer de l'énergie du faisceau excitateur au faisceau accéléré avec 50% d'efficacité, 20 mégawatts de puissance seraient perdus dans les deux fines colonnes de plasma. Idéalement, nous pourrions en récupérer une partie, mais c'est loin d'être simple.

Les scientifiques ont accompli d'importants progrès sur les technologies nécessaires à la partie électrons d'un collisionneur linéaire à plasma, mais l'accélération des positrons n'en est, elle, qu'à ses balbutiements. Une décennie de recherches fondamentales et concertées sera nécessaire pour amener les positrons au même point que celui que nous avons atteints

avec les électrons. Une option alternative consisterait à faire collisionner des électrons avec des électrons ou même avec des protons, dans une machine où l'un des deux accélérateurs d'électrons, voire les deux, serait fondé sur un accélérateur à plasma. Un autre concept exploré au Cern est la modulation d'un paquet de protons de plusieurs centimètres de longueur en l'envoyant à travers une colonne de plasma et en utilisant le champ de sillage qui l'accompagne pour accélérer un paquet d'électrons.

L'avenir des accélérateurs à plasma est incertain, mais passionnant. Il semble possible que, d'ici à une décennie, nous puissions construire des accélérateurs à plasma de 10 GeV tenant sur une grande table pour diverses applications commerciales et scientifiques en utilisant les lasers ou les accélérateurs d'électrons existants. Mais nous serions encore loin de mettre au point un collisionneur linéaire à plasma permettant des découvertes d'une nouvelle physique. Pourtant, même avec la perspective du ILC et du FCC, nous pensons utile de persister dans le perfectionnement d'une technologie exotique qui conduirait à des économies en taille et en dépenses. À ce titre, la technologie du plasma offre aux chercheurs une occasion formidable de prendre des risques, d'être créatifs, de résoudre des problèmes fascinants et un jour, qui sait, de découvrir de nouveaux éléments fondamentaux de la nature!

— L'auteur —

> **Chandrashekhar Joshi** est professeur de génie électrique à l'université de Californie, à Los Angeles (UCLA), où il dirige le groupe Laser-Plasma.

— À lire —

> **W. Wang et al.**, Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator, *Nature*, vol. 595, pp. 516-520, 2021.

> **A. Cho**, This is the first mini-particle accelerator to power a laser, *Science*, 2021. <https://bit.ly/3dzocp5>

> Site du consortium Eupraxia : www.eupraxia-project.eu

> **R. Bingham et al.**, Introduction to plasma accelerators: The basics, Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake Acceleration, Cern, 2016.