



Feuille de route suisse pour les infrastructures de recherche en vue du message FRI 2025 – 2028 (Feuille de route suisse pour les infrastructures de recherche 2023)

Partie III: La Suisse dans les organisations internationales de recherche: un instrument diplomatique au service de la science suisse



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR
**Secrétariat d'Etat à la formation,
à la recherche et à l'innovation SEFRI**

Photo de couverture : ATLAS est l'un des détecteurs de particules du grand collisionneur de hadrons LHC, le plus grand accélérateur de particules au monde.
Photo : CERN

Impressum

Éditeur : © 2023 Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation
Rédaction : Francesca Stocker, Patrice Soom
Traduction : service linguistique SEFRI et Chancellerie fédérale
Langues : français, allemand, anglais
Mise en page : Grafikatelier Saxer, Berne

Contact

Xavier Reymond
Chef de l'unité Organisations internationales de recherche
xavier.reymond@sbfi.admin.ch

Table des matières

La Suisse dans les organisations internationales de recherche	5
Laboratoire européen pour la physique des particules (CERN)	8
L'Observatoire européen austral (ESO)	14
Square Kilometre Array Observatory (SKAO)	16
Cherenkov Telescope Array Observatory CTAO	18
Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL)	20
Laser européen à électrons libres et à rayons X (European XFEL)	22
Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF)	24
Institut Laue-Langevin (ILL)	26
Source européenne de spallation (ESS)	28
Réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER)	30

La Suisse dans les organisations internationales de recherche

Depuis les années 1950, avec la fondation du CERN, les organisations internationales de recherche donnent des impulsions scientifiques et technologiques importantes grâce à la construction et à l'exploitation d'infrastructures de recherche parmi les plus performantes au monde. C'est pourquoi la Confédération soutient l'accès de la recherche helvétique aux organisations d'importance stratégique fondées sur le droit international.

Repousser toujours plus loin les limites de notre connaissance scientifique de l'infiniment grand, de l'infiniment petit ou de l'infiniment rapide repose sur le développement d'instruments toujours plus performants et plus complexes. L'étude de la matière demande aujourd'hui des accélérateurs permettant de propulser des particules les unes contre les autres à des vitesses proches de celle de la lumière alors que l'observation du cosmos requiert de placer d'imposants télescopes en haute altitude, voire dans l'espace.

Repousser les limites de nos connaissances scientifiques grâce à la collaboration internationale

Les avancées scientifiques majeures, en particulier dans les sciences physiques, nécessitent des instruments dont la complexité et les coûts dépassent les capacités d'une institution de recherche ou même d'un seul État. Les organisations internationales de recherche offrent une forme de collaboration scientifique fédérant les aspirations scientifiques de plusieurs nations afin de permettre la réalisation d'instruments de recherche d'envergure mondiale. Ce sont des entités dotées d'une personnalité juridique propre et établies par un accord de droit international public liant les gouvernements des États impliqués. Leur pilotage stratégique est assuré par leurs États membres au travers d'une structure de gouvernance propre.

Le caractère multilatéral de ces organisations, couplé à leur complexité technique et à leurs coûts, impose à leurs États membres de multiples défis technologiques, organisationnels et politiques. De telles organisations ne sont donc établies que lorsqu'aucune autre solution ne peut être identifiée pour répondre aux besoins des communautés scientifiques.

Les premières organisations internationales de recherche ont été fondées au milieu du 20^e siècle sur le modèle des organisations internationales établies après la Seconde Guerre mondiale. C'est en particulier le cas du CERN, fondé en 1954. D'autres ont été ensuite créées sur ce modèle et sont présentées dans les pages qui suivent. Reflétant le développement continu de nos connaissances scientifiques, mais aussi les nouvelles possibilités de collaboration internationale amenées par la numérisation, le nombre d'organisations internationales de recherche a rapidement augmenté durant les deux dernières décennies. Ces organisations sont appelées à gagner en importance et à toucher un éventail toujours plus large de domaines scientifiques. Des disciplines aussi variées que la physique, la médecine ou l'archéologie profitent d'ores et déjà d'instruments de pointe qui ne sauraient exister sans de telles collaborations scientifiques internationales menées sous l'égide de gouvernements.

La société tout entière bénéficie de cette évolution. Elle profite des connaissances qui sont acquises au sein des organisations internationales de recherche, mais aussi des progrès technologiques que celles-ci stimulent. À titre d'exemples, le World Wide Web ou encore les électroaimants qui ont permis le développement de l'imagerie médicale par résonance magnétique, sont des produits indirects des recherches menées au CERN.

La Suisse dans les organisations internationales de recherche

La Suisse participe aux organisations internationales de recherche les plus pertinentes pour sa communauté scientifique. La majorité d'entre elles ont déjà construit avec succès des infrastructures de pointe qui sont aujourd'hui utilisées par des chercheurs qui y conduisent des expériences de pointe. Elles continuent en parallèle à développer leurs capacités. D'autres organisations viennent de lancer la construction de leurs infrastructures.

Dans l'ensemble, l'investissement consenti par la Confédération dans le domaine des organisations internationales de recherche s'élève à environ 100 millions de francs par an.

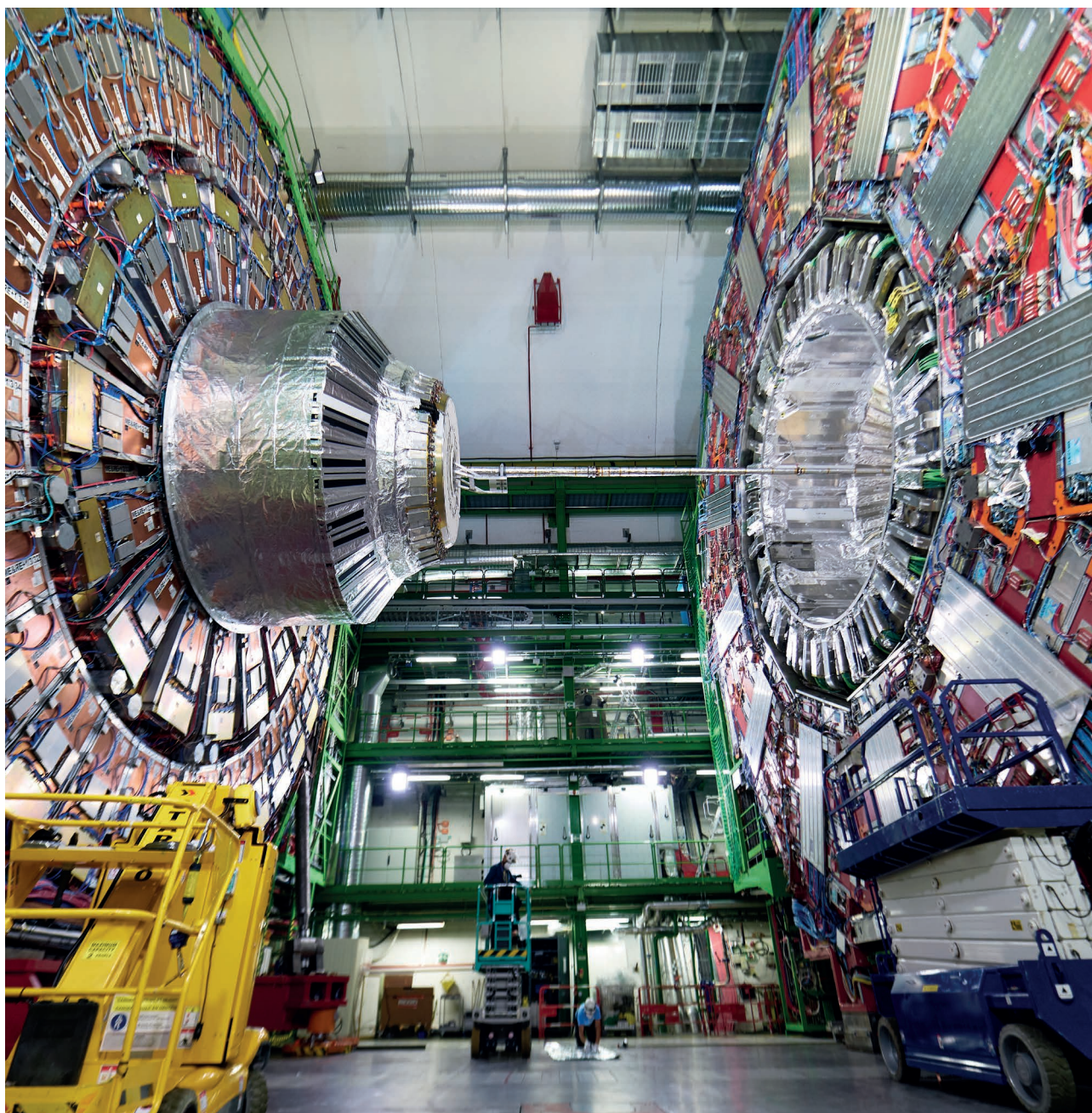
La participation suisse à ces organisations, dont les contours ont été négociés au cas par cas, apporte de nombreux bénéfices à la Suisse :

- L'accès à des infrastructures et à des instruments qui comptent parmi les meilleurs au monde est une condition sine qua non de l'excellence de la recherche helvétique dans de nombreux domaines scientifiques. La haute qualité des recherches suisses et la bonne organisation des différentes communautés scientifiques concernées permet d'épuiser, voire de dépasser, les ressources et temps d'utilisation accessibles à la Suisse auprès des organisations internationales de recherche.
- Les multiples formes de collaboration scientifique au sein des organisations internationales de recherche contribuent à l'ouverture et à la mise en réseau à l'international de la recherche suisse.
- La construction, l'entretien et l'amélioration des infrastructures exploitées par les organisations internationales constituent un marché privilégié pour les institutions de recherche et les entreprises suisses de haute technologie qui développent et livrent des composants et des services à haute valeur ajoutée. Prise dans son ensemble, la valeur des biens et des services achetés en Suisse par les organisations internationales de recherche atteint, voire dépasse, chaque année les investissements consentis par la Suisse.
- L'exemple du CERN, situé à Genève, montre en outre que la Suisse profite à de nombreux égards du fait d'être État-hôte d'une telle organisation de recherche internationale, notamment en termes d'emplois ou de mandats octroyés à des entreprises suisses.

Comment la Confédération choisit-elle les organisations internationales de recherche dans lesquelles investir ?

Les institutions de recherche bénéficient en Suisse d'un grand degré d'autonomie. À ce titre, il leur revient en premier lieu de déterminer leurs priorités en matière d'investissements dans les infrastructures de recherche. Il revient toutefois à la Confédération, selon la stratégie internationale de la Suisse dans le domaine de la formation, de la recherche et de l'innovation, de s'assurer que les acteurs de la recherche et de l'innovation suisses disposent des infrastructures de recherche nécessaires pour préserver et développer la qualité de leurs travaux. Aussi le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) surveille-t-il les développements dans le domaine des organisations internationales de recherche. Conformément au principe de subsidiarité, lorsque la nécessité de participer à une organisation internationale de recherche fait l'objet d'un consensus au sein de la communauté scientifique suisse, mais que les institutions de recherche suisses ne sauraient assumer elles-mêmes la responsabilité financière et politique correspondante, le SEFRI intervient pour organiser les étapes en vue d'une éventuelle adhésion, via le processus de la Feuille de route suisse pour les infrastructures de recherche.

Afin de garantir la flexibilité nécessaire au développement de la recherche suisse de pointe, la loi fédérale sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation (LERI) donne au Conseil fédéral la compétence de conclure des accords internationaux dans le domaine de la recherche et de l'innovation et par là de rejoindre des organisations internationales de recherche. Les éventuels engagements financiers correspondants doivent toutefois être approuvés par l'Assemblée fédérale.

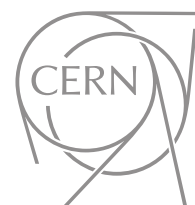


Le détecteur CMS prêt pour être refermé et remis en service. Photo : CERN

Laboratoire européen pour la physique des particules (CERN)

Fondé en 1954 et situé près de Genève, le Laboratoire européen pour la physique des particules (CERN) est le fer de lance de la coopération pacifique entre États européens dans les domaines de la physique nucléaire et de la physique des particules. Il se consacre à la recherche fondamentale sur la structure de la matière et sur les interactions entre les particules élémentaires. Il vise à répondre aux questions les plus fondamentales concernant la constitution et le fonctionnement de notre univers en étudiant des collisions entre des particules accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière. Les découvertes du CERN révolutionnent la physique des particules depuis 70 ans. La communauté scientifique a réalisé de nombreuses avancées importantes aussi bien au niveau de la recherche fondamentale qu'en matière d'applications pratiques dont bénéficie aujourd'hui la société dans son ensemble.

Année de fondation	1954
Membres	Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Israël, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Serbie, Suède, Suisse, Tchéquie
Membres associés	Chypre, Croatie, Estonie, Inde, Lettonie, Lituanie, Pakistan, Slovénie, Turquie, Ukraine
Forme juridique	Organisation de droit international public
État siège	Suisse
Sites d'implantation	Région de Genève (Suisse et France)
Domaine de recherche	Physique des particules
Budget annuel	1200 millions de francs
Statut de la Suisse	État membre et État siège
Taux de contribution de la Suisse	3,9 %
Site internet	www.cern.ch



A la recherche des lois et constituants fondamentaux de notre univers

Le CERN met à la disposition de la communauté scientifique des accélérateurs de particules permettant de mener des recherches de pointe dans le domaine de la physique nucléaire et de la physique des particules. Ce complexe de laboratoires et d'accélérateurs unique au monde offre la possibilité à des scientifiques venant des quatre coins du globe d'étudier ensemble les constituants élémentaires de la matière et les forces qui les relient entre elles.

Notre compréhension de la physique des particules repose aujourd'hui sur le Modèle standard, qui décrit toutes les particules élémentaires connues ainsi que leurs interactions fondamentales. Ce modèle intègre les principales

découvertes dans le domaine de la physique des particules. Il a été élaboré par les physiciens théoriciens sous la forme d'une théorie quantique des champs. Le programme de recherche expérimental du CERN a pour ambition d'apporter des preuves empiriques permettant de confirmer ou d'infirmer les modèles formulés par la physique théorique contemporaine. De nombreuses prédictions du Modèle standard ont été vérifiées expérimentalement au CERN. Pour ce faire, des détecteurs mesurent extrêmement précisément les propriétés des particules accélérées, de leurs collisions et des nouvelles particules qui en résultent. Pour comprendre au mieux de quoi est constitué l'Univers et comment il fonctionne, il importe d'associer physique théorique et physique expérimentale, car l'une ne va pas sans l'autre.



Vue du tracé souterrain de l'actuel grand collisionneur de hadrons (LHC) au CERN. Illustration : CERN

Le CERN est perçu comme l'exemple le plus remarquable au monde de collaboration pacifique entre États et de diplomatie scientifique. La Convention du CERN est entrée en vigueur en 1954, il y a presque 70 ans maintenant, soit neuf ans après la fin de la Seconde Guerre mondiale.

Accélérateurs et collisionneurs de particules

L'infrastructure du CERN n'a cessé de se développer et de s'étendre depuis la création de l'organisation. Les premiers accélérateurs de particules ont été construits et exploités du côté suisse, à Meyrin, le long de la frontière avec la France. Au fil du temps, le CERN s'est aussi étendu du côté français.

Aujourd'hui, le CERN héberge l'accélérateur de particules le plus grand et le plus puissant du monde, le grand collisionneur de hadrons (LHC), qui a été mis en service en 2008. Le LHC consiste en un anneau installé dans un tunnel de 27 kilomètres de long. La machine permettant d'accélérer des paquets de protons à une vitesse proche de celle de la lumière est extrêmement complexe. Les particules sont accélérées et maintenues par de puissants aimants supraconducteurs sur leur trajectoire dans deux tubes circulaires placés sous vide. Tour après tour, les particules accumulent de l'énergie. Lorsque le niveau d'énergie désiré est atteint, des paquets de particules tournant en sens opposés se percutent à quatre points différents de

l'anneau. Sous l'effet de la collision, les protons perdent leur structure interne et donnent naissance à de nouvelles particules. Aux points de collision se trouvent les détecteurs de particules ATLAS, CMS, ALICE et LHCb, qui peuvent mesurer avec précision l'énergie et la trajectoire des nouvelles particules. Les deux premiers ont découvert le boson de Higgs en 2012, indépendamment l'un de l'autre.

La construction et l'exploitation du LHC et des détecteurs de très grande taille, mais aussi l'analyse et l'interprétation des données qui sont générées, requièrent des ressources importantes en matériel et en personnel. Le CERN accueille chaque année plus de 10 000 personnes dans ses murs, dont un grand nombre pour des séjours plus ou moins long de recherche. Les détecteurs ATLAS et CMS reposent par exemple chacun sur des collaborations impliquant quelque 1000 scientifiques.

Les activités de recherche fondamentale menées au CERN portent non seulement sur les quatre grandes expériences ATLAS, CMS, ALICE et LHCb mais aussi sur un certain nombre d'autres domaines. Dans le hall dédié à l'antimatière, appelé Antimatter Factory, le CERN tente de déterminer si l'antimatière se comporte comme la matière sous l'effet de la gravité. Le CERN poursuit également ses travaux dans l'espace: le Spectromètre Magnétique Alpha (AMS), arrimé à la Station spatiale internationale ISS, recherche la présence de matière noire et mesure le spectre des rayons cosmiques. Le CERN est également très actif dans la recherche et le développement de technologies dans le domaine des détecteurs. Enfin, il dispose d'un hall de tests entièrement réservé au développement d'aimants supraconducteurs encore plus puissants et de laboratoires consacrés aux recherches sur de nouveaux types de puces électroniques.

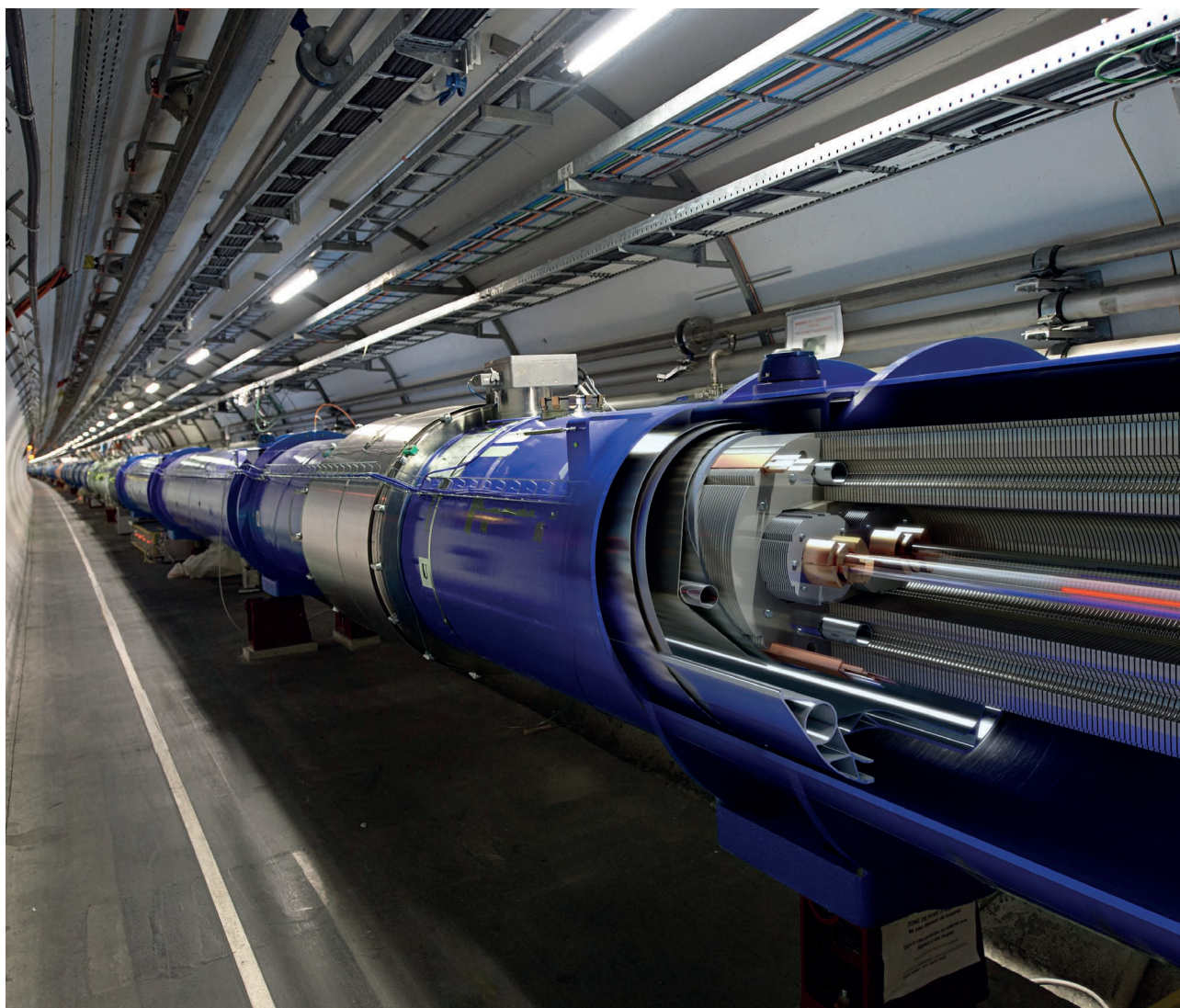
Repousser les limites de la physique des particules actuelle

Le Modèle standard décrit de façon très satisfaisante les propriétés mesurées des particules élémentaires. Il unifie trois des quatre interactions fondamentales connues de la physique. Néanmoins, d'importantes questions restent sans réponse et laissent penser que cette théorie n'est qu'un pan d'une théorie plus large qui reste encore à formuler. Il y a toute une série de phénomènes que le Modèle standard ne décrit pas: l'énergie noire et la matière noire ou encore l'intégration de la gravité parmi les interactions fondamentales. Par ailleurs, à des niveaux d'énergie très élevés, comme lors du Big Bang, la théorie quantique entre en contradiction avec la théorie de la relativité générale. Le développement d'une théorie générale unifiée prenant en compte l'ensemble de ces

phénomènes constituerait le Graal de la physique des particules. Les expériences du CERN ont pour but d'explorer les limites du Modèle standard pour y détecter des failles et des imperfections. La découverte de phénomènes qui ne sont pas encore décrits dans la théorie actuelle offre justement aux chercheurs la possibilité de développer de nouvelles théories afin de résoudre ce qui apparaît aujourd'hui encore comme de profondes incohérences.

Afin d'élargir la recherche sur ces failles et ces imperfections dans le Modèle standard, le LHC fera place d'ici à 2029 au LHC à haute luminosité (HL-LHC). L'objectif est d'accroître significativement la puissance du plus grand accélérateur de particules grâce à diverses innovations techniques. Le HL-LHC sera en mesure d'augmenter la production de bosons de Higgs d'un facteur 5 pour atteindre le chiffre de 15 millions par an. Grâce à cette amélioration, les scientifiques pourront mesurer avec une précision inégalée les propriétés du boson de Higgs et étudier ses désintégrations rares.

Le potentiel scientifique du HL-LHC devrait être épuisé d'ici à 2040. L'avenir de la physique des particules dans le domaine des accélérateurs était toutefois déjà en 2020 au cœur de la mise à jour de la Stratégie européenne pour la physique des particules. Il ressort de ce document stratégique que de nouvelles découvertes et de nouveaux résultats ne pourront être obtenus que par la conception et la construction d'une nouvelle machine capable de faire entrer en collision des particules à des énergies encore plus élevées et avec une intensité encore plus grande. Des niveaux d'énergie plus élevés permettront d'étudier la matière à des échelles encore plus petites et pourront ouvrir la voie à la découverte de particules encore inconnues. Un accélérateur de 91 km de long, le «futur collisionneur circulaire» (FCC), permettrait d'atteindre des énergies maximales dix fois plus élevées que les niveaux atteints aujourd'hui avec le LHC et porterait la production de bosons de Higgs à un niveau 100 fois plus élevé que le HL-LHC. Le CERN a été chargé par ses États membres d'étudier, d'ici fin 2025, la faisabilité technique et financière d'un FCC sur son site actuel. Celui-ci apparaît en effet comme étant le seul site au monde possédant l'infrastructure et l'expertise nécessaires pour une telle machine. En sa qualité d'État siège, la Suisse se félicite de la réalisation de cette étude de faisabilité et soutient le CERN là où cela est nécessaire. Si les résultats de l'étude sont positifs et qu'une décision est prise en faveur d'une mise en œuvre du projet FCC, les fondations nécessaires à la poursuite de la recherche de pointe dans le domaine de la physique des hautes énergies seront posées pour les 60 prochaines années.



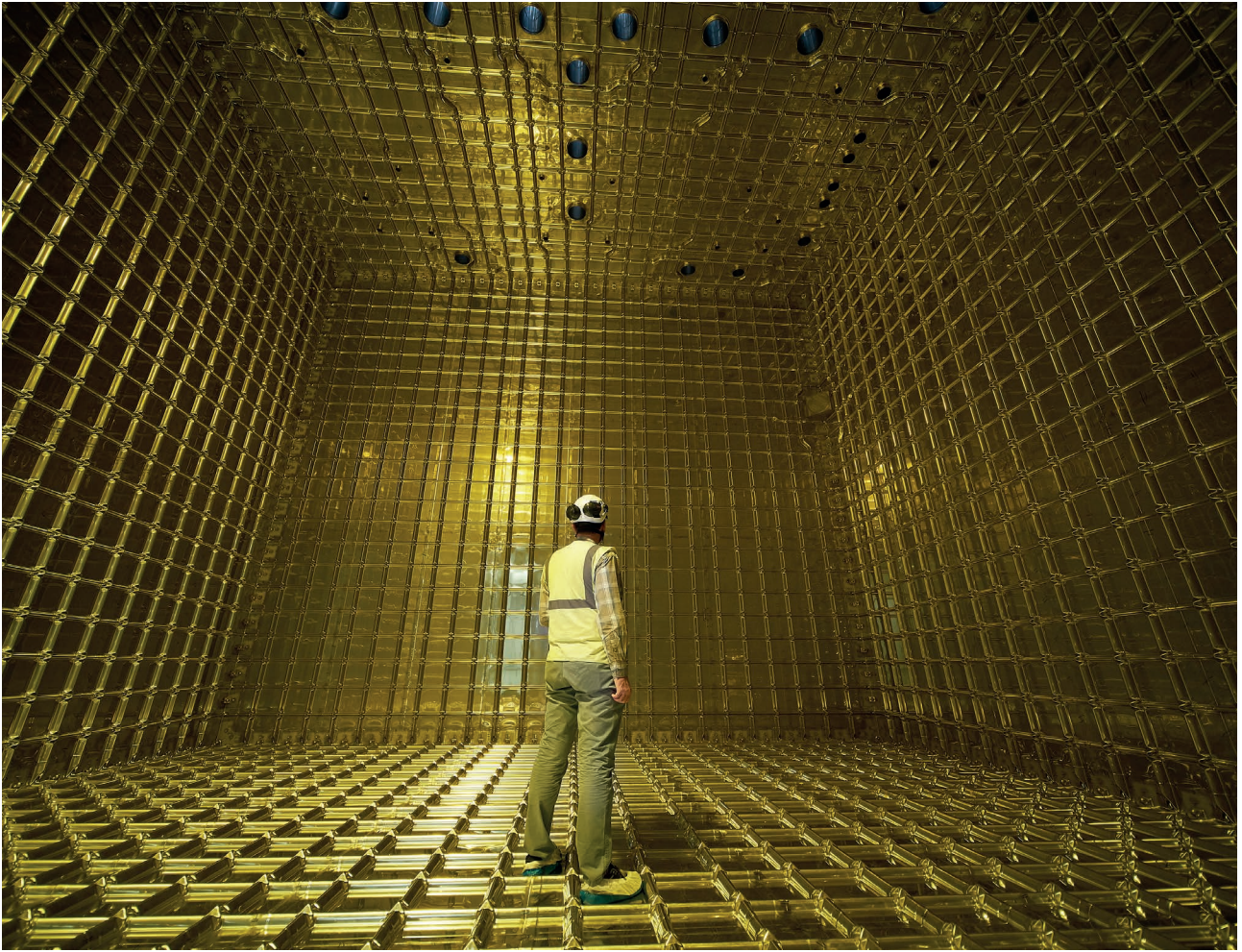
Vue tridimensionnelle de l'intérieur du dipôle du LHC. Photo : CERN

Le CERN nourrit la science et la société contemporaines

Les connaissances générées au CERN sont déterminantes pour un vaste ensemble des sciences naturelles, allant des sciences des matériaux au traitement des données en passant par la physique médicale et la radiothérapie. Nombre de découvertes essentielles sur la structure de la matière et sur les lois fondamentales régissant la physique ont été faites au CERN. En 1983, des scientifiques du CERN ont par exemple découvert les bosons W et Z, ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1984. Le boson de Higgs a, lui, été découvert au CERN en 2012 après que l'hypothèse de son existence a été formulée pour la première fois en 1964 par les théoriciens François Englert et Peter Higgs. Il a fallu presque 50 ans pour en confirmer l'existence grâce au LHC et aux détecteurs ATLAS et CMS. En 2013, les deux théoriciens se sont vu décerner le prix Nobel de physique pour

l'élaboration du mécanisme de Higgs qui décrit comment les particules élémentaires acquièrent une masse lors de leur interaction avec le champ de Higgs.

Au-delà de son rôle purement scientifique, le CERN est un moteur constant d'innovation dans de nombreux domaines. Ainsi, le World Wide Web est-il né au CERN du besoin d'échanger des données scientifiques avec d'autres centres de recherche. Qu'il s'agisse par exemple des électro-aimants nécessaires à l'émergence de l'imagerie médicale par résonance magnétique, des technologies supraconductrices susceptibles de renforcer l'efficacité de nos réseaux électriques ou encore d'accélérateurs miniaturisés dédiés à la lutte contre le cancer, les recherches conduites au CERN essaient progrès et innovation sur le chemin.



Dans le cadre d'une collaboration internationale dédiée à l'expérience DUNE aux États-Unis, le détecteur ProtoDUNE a été construit et testé avec succès au CERN. Photo : CERN.

La Suisse au cœur de la mégascience contemporaine

La Suisse en tant qu'État membre et État siège tire des avantages à différents égards de la présence du CERN sur son sol. Elle profite premièrement, au même titre que tous les membres du CERN, de l'immense volume de connaissances scientifiques qui sont produites. Du fait de la proximité géographique avec le CERN, une filière de renom international dans le domaine de la physique des accélérateurs s'est développée en Suisse. En outre, des groupes de recherche issus de toutes les grandes hautes écoles suisses collaborent à des expériences d'envergure au CERN et y apportent une contribution scientifique significative. En effet, outre les deux écoles polytechniques fédérales (EPF), l'Institut Paul Scherrer (PSI) et les Universités de Berne, de Bâle, de Genève et de Zurich participent aux projets du CERN.

Rapportée à la part de la Suisse dans le budget annuel, les citoyens suisses travaillant au CERN représentent une part particulièrement élevée du personnel. Outre le personnel scientifique employé ou invité par le CERN, de nombreuses personnes résidant en Suisse sont amenées à y assumer des fonctions administratives ou techniques de haut niveau. En raison de sa situation géographique, le CERN conclut de nombreux contrats industriels ou de services avec des entreprises genevoises ou suisses. Le secteur de la haute technologie bénéficie particulièrement de la présence du CERN, principalement dans le domaine des techniques cryogéniques, des supraconducteurs, des techniques du vide, de la microélectronique, de la construction et de l'ingénierie. Il convient également de souligner la très forte proportion de personnes hautement qualifiées qui travaillent au CERN. Près de 64 % des chercheurs du

CERN quittant le CERN n’embrassent pas une carrière académique mais se tournent vers l’industrie (45 %) ou un autre domaine (19 %). Il n’est pas rare de voir des personnes hautement qualifiées qui sont passées par le CERN trouver un emploi en Suisse dans le secteur de l’industrie et de l’innovation.

La politique d’Etat-hôte de la Suisse

La Suisse est l’État siège de diverses organisations et conférences internationales depuis plus de 150 ans. Elle jouit sur la scène internationale du statut de principal centre pour la gouvernance globale et le rôle d’État siège est ancré dans sa tradition et sa politique de bons offices. La Genève internationale est connue dans le monde entier pour être le centre opérationnel du système politique multilatéral. Notre pays poursuit une stratégie active afin de renforcer son attractivité et sa compétitivité en tant qu’État siège. Les avantages d’un tel statut sont en effet loin d’être négligeables. Il est par exemple beaucoup plus facile d’accéder aux organisations internationales et à leurs dirigeants ainsi qu’aux divers fonctionnaires, experts et délégués. La politique extérieure suisse a pour sa part à sa disposition une plateforme sans égal pour relayer ses messages. L’attention accordée aux organisations internationales situées en Suisse confère de manière générale une visibilité accrue à la Suisse. En offrant aux acteurs internationaux des conditions-cadres optimales, la Suisse contribue pour une grande part au bon fonctionnement des relations internationales et à la maîtrise des grands enjeux multilatéraux. Le rôle d’État siège conforte sa position d’État membre de ces organisations internationales et inversement.

La présence du CERN en Suisse apporte une plus-value économique substantielle à la région et au pays dans son ensemble. Les personnes employées dans les organisations internationales vivent dans la région, où elles font aussi leurs courses et où elles ont souvent acquis un bien immobilier. Une grande partie de leurs salaires est par conséquent dépensée en Suisse. L’encouragement du rôle d’État siège de la Suisse au travers d’investissements publics dans les conditions-cadres et l’infrastructure (immeubles de bureaux, centres de conférence, etc.) constitue un investissement économique et politique direct, avec une garantie de succès à la clé.

En raison de tous ces avantages, la Suisse soutient le multilatéralisme et s’engage pour proposer un environnement attrayant et des conditions-cadres d’exception aux organisations internationales. Cet engagement repose aujourd’hui sur la Loi sur l’État hôte (LEH) adoptée par l’Assemblée fédérale en 2007. La LEH définit quelles sont les personnes susceptibles de bénéficier de privilèges, d’immunités et de facilités ainsi que de contributions financières découlant du droit international, la base étant la Convention de Vienne du 18 avril 1961 sur les relations diplomatiques et les accords de siège conclu avec des organisations ayant leur siège en Suisse. Elle fixe également les conditions dans lesquelles les bénéficiaires peuvent se voir accorder un statut particulier et des subsides financiers. Le CERN fait partie de ces bénéficiaires et a une place à part dans la mesure où il s’agit de la seule organisation de recherche internationale ayant son siège en Suisse, mais dans le même temps de la plus grande au monde.

Le 10 décembre 2021, le Conseil fédéral a décidé que la Suisse soutiendrait le développement à long terme du CERN, notamment sur le plan de l’aménagement du territoire. Ce soutien passe par l’élaboration d’un plan sectoriel fédéral centré sur les projets du CERN et de la base légale correspondante. Le plan sectoriel visera à clarifier et à faciliter les procédures concernant l’aménagement du territoire. Il répondra ainsi à une demande du canton de Genève. L’objectif est de garantir une meilleure sécurité de la planification des projets du CERN et de constituer un cadre pour prendre en considération tous les enjeux entre les objectifs des différentes politiques publiques (politique de la recherche, politique d’État hôte et politique d’organisation du territoire). Il est dans l’intérêt de la région genevoise, de la Suisse en sa qualité de centre de gouvernance mondiale, de la communauté scientifique suisse, du fait de son expertise remarquable dans le domaine de la physique des accélérateurs, et du paysage de l’industrie et de l’innovation de haute technologie de la Suisse que le CERN continue à se développer pour devenir le laboratoire mondial de la physique des particules grâce à un nouvel accélérateur comme le FCC.

L'Observatoire européen austral (ESO)

L'Observatoire européen austral (ESO) est l'infrastructure européenne la plus importante pour la recherche en astronomie et l'observatoire le plus productif au monde. Il réunit les conditions indispensables à la recherche de pointe en astronomie grâce à d'imposants télescopes érigés sur différents sites du désert d'Atacama au Chili. L'organisation joue également un rôle crucial dans l'encouragement de la coopération internationale dans le domaine de l'astronomie.

Année de fondation	1962
Membres	Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Italie, Irlande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse
Forme juridique	Organisation de droit international public
État siège	Allemagne
Sites d'implantation	Garching (Allemagne) Santiago, La Silla, Paranal et Chajnantor (Chili)
Domaines de recherche	Astronomie et astrophysique
Budget annuel	240 millions d'euros
Statut de la Suisse	Membre
Taux de contribution de la Suisse	4,5 %
Site internet	www.eso.org



Observer et comprendre le cosmos

L'ESO a pour objectif de mettre à disposition des astronomes et des astrophysiciens les installations de recherche terrestres les plus modernes afin d'étudier des portions précises du spectre électromagnétique et ainsi repousser les limites de notre compréhension du cosmos. D'importantes découvertes, notamment sur l'origine et le devenir de l'univers, sont aujourd'hui faites grâce aux plus grands télescopes terrestres. En outre, l'ESO développe des technologies pionnières visant à corriger la déformation des miroirs (optique active) ou à mesurer des ondes (interférométrie).

Des installations terrestres haut de gamme pour l'astronomie de pointe

Les observatoires de l'ESO sont installés dans le désert d'Atacama au Chili à des hauteurs comprises entre 2000 et 5000 m au-dessus du niveau de la mer. Une plus grande partie de la Voie lactée est en effet observable depuis l'hémisphère sud. En outre, le ciel y est observable dans sa quasi-totalité (95 %) depuis les sites chiliens et les conditions atmosphériques sont optimales en altitude.

L'ESO met à disposition des astronomes des instruments d'observation modernes et dont la diversité s'est accrue au fil des décennies.

- L'observatoire de La Silla abrite différents télescopes de taille moyenne dont l'exploitation est assurée par l'ESO depuis sa création dans les années 60. Parmi ces instruments se trouve notamment le télescope Euler de l'Observatoire de Genève d'un diamètre de 1,2 m.
- Le Very Large Telescope (VLT) permet d'effectuer des observations à la fois dans les domaines du visible et de l'infrarouge. Il est composé de quatre télescopes unitaires de 8,2 m de diamètre dont les images respectives peuvent être combinées pour déterminer avec une précision extrême la position des étoiles et d'autres objets célestes. L'installation peut être complétée par quatre télescopes auxiliaires qui possèdent chacun un miroir de 1,8 m de diamètre.
- Le Grand réseau d'antennes millimétrique et sub-millimétrique de l'Atacama (ALMA) est un réseau de radiotélescopes de pointe composé de 66 antennes de grande précision qui permet l'étude de l'univers dans le domaine des ondes millimétriques et



Représentation artistique de l'Extremely Large Telescope (ELT) en fonctionnement sur le Cerro Armazones, dans le nord du Chili. Actuellement en construction, le télescope de 39 mètres de large utilisera des lasers pour créer des étoiles artificielles dans l'atmosphère afin de corriger l'impact de celle-ci sur les observations. Illustration : ESO/L. Calçada

submillimétriques. ALMA est un projet de coopération internationale géré par l'ESO en partenariat avec des institutions de recherche américaines et japonaises.

Vers un télescope de tous les superlatifs

En cours de construction, l'Extremely Large Telescope (ELT) sera, une fois achevé, le plus grand télescope du monde avec un miroir principal de 39 m de diamètre constitué de 798 segments hexagonaux. Sa mise en service, prévue pour 2027, devrait radicalement changer notre perception de l'univers. Elle permettra notamment l'étude d'objets tels que les planètes en orbite autour d'autres étoiles, les premiers objets de l'univers, les trous noirs supermassifs ainsi que la nature et la distribution de la matière et de l'énergie noires.

60 ans de découvertes grâce à l'ESO

On doit par exemple aux installations de La Silla les découvertes du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée ou encore celle de l'accélération de l'expansion de l'univers. Cette dernière découverte a été récompensée par le Prix Nobel de physique en 2011. Les instruments de l'ESO ont également permis la réalisation de la première photographie d'une planète située en dehors de notre système solaire (exoplanète) en 2004 et ont largement contribué à la capture de la première image d'un trou noir au printemps 2019.

Participation de la Suisse à l'ESO

La Suisse est membre de l'ESO depuis 1982. Sa participation est essentielle pour le pôle de recherche suisse, car les acteurs de la recherche nationale utilisent les données récoltées par les instruments de l'ESO, dont la qualité et la

diversité garantissent une recherche de pointe. Outre l'utilisation scientifique des instruments et l'accès à un réseau international, les institutions de recherche et entreprises suisses ont la possibilité de participer à la construction des installations.

Construit en Suisse, le télescope Euler d'un diamètre de 1,2 m est exploité par l'Université de Genève sur le site de La Silla. Il est utilisé pour la recherche d'exoplanètes. La découverte en 1995 de la première exoplanète par les professeurs Michel Mayor et Didier Queloz de l'Université de Genève a été récompensée par le Prix Nobel de physique en 2019.

L'ESO est une organisation de grande importance pour les institutions de recherche et les entreprises suisses, notamment en ce qui concerne le développement de nouveaux instruments. Installé sur le Very Large Telescope (VLT), le spectrographe ESPRESSO est un instrument qui sert à la recherche d'exoplanètes rocheuses similaires à la Terre. Le professeur Francesco Pepe de l'Université de Genève dirige le projet ESPRESSO auquel contribue aussi l'Université de Berne. Des institutions suisses participent par ailleurs au développement d'instruments pour l'ELT. L'ETH Zurich participe au consortium chargé du développement de l'instrument METIS, un imageur et spectrographe de grande puissance. Enfin, le professeur émérite Willy Benz de l'Université de Berne a assumé la fonction de présidence du Conseil de l'ESO de 2018 à 2020.

Square Kilometre Array Observatory (SKAO)

Grâce à des radiotélescopes terrestres à la pointe de la technologie, le Square Kilometre Array Observatory (SKAO) pourra observer le ciel avec une résolution et une sensibilité inégalées. Il exploitera un réseau de plus de 100'000 antennes implantées en Australie et en Afrique du Sud afin de mener des observations susceptibles de révolutionner notre compréhension de l'univers et de la physique fondamentale. L'organisation chargée de la construction et de l'exploitation de l'infrastructure SKAO a été fondée en 2021. L'observatoire sera réalisé en plusieurs phases, en commençant par sa première configuration «SKA-1», déployée et progressivement mise en service entre 2021 et 2030.

Année de fondation	2021
Membres	Australie, Afrique du Sud, Chine, Italie, Pays-Bas, Portugal, Suisse, Royaume-Uni
Forme juridique	Organisation de droit international public
État siège	Royaume-Uni
Sites d'implantation	Jodrell Bank (Royaume-Uni) Australie, Afrique du Sud (États hôtes)
Domaine de recherche	Astronomie et astrophysique
Budget de construction	1'986 millions d'euros
Statut de la Suisse	Membre
Taux de contribution de la Suisse	1,3 %
Site internet	www.skao.int



À l'écoute du cosmos

Les objectifs scientifiques de SKAO ont été fixés de façon à englober un large champ. Le réseau d'antennes de SKAO détectera avec une précision inégalée les signaux dans le domaine des ondes radio. Mieux comprendre la formation des planètes semblables à la Terre : c'est le défi visé par SKAO, qui ouvre de nouvelles perspectives et apportera de nouvelles réponses. Ses radiotélescopes pourront observer des disques protoplanétaires dans les régions de formation stellaire et y examiner le spectre d'émission de l'hydrogène neutre – une clé pour mieux comprendre ces planètes si particulières qui ressemblent à la Terre.

Un simple coup d'œil à notre environnement plus proche suffit à faire émerger une série de questions encore non résolues : par exemple, on ne sait toujours pas pourquoi la couronne du Soleil est plus chaude que sa surface, ni comment se développent et quelle est la dynamique des tempêtes solaires. En s'appuyant sur des images du soleil à haute résolution, captées dans la gamme des radiofréquences, SKAO pourra fournir de précieuses prévisions

«météorologiques» pour notre système solaire, car les tempêtes solaires ont par exemple un impact direct sur les satellites de communication et certaines infrastructures terrestres.

SKAO pourra également orienter ses observations vers le cœur de notre galaxie, la Voie lactée. C'est là que se trouve le trou noir le plus proche de notre planète, lequel recèle encore de nombreux secrets. Dans le même temps, l'étude des radiofréquences est particulièrement appropriée pour l'étude des galaxies lointaines et des amas stellaires. À partir de ces observations, SKAO pourra mesurer la force de l'énergie noire, responsable de l'expansion de l'univers mais dont la nature reste un profond mystère.

100 000 antennes réparties sur deux continents

SKAO couvrira la partie du spectre électromagnétique qui présente une énergie plus basse et des ondes plus longues que la lumière visible. Il complètera ainsi les installations d'ESO et de CTAO pour couvrir une très large portion du spectre électromagnétique.



Le réseau de radiotélescope SKAO combinera les signaux de près de 100 000 antennes pour former un télescope virtuel dont l'ouverture sera égale à la distance séparant l'Afrique et l'Australie. Illustration : SKAO

Les radiotélescopes de SKAO révolutionneront la radio-astronomie. SKAO pourra observer simultanément de vastes régions du ciel avec une résolution et une sensibilité considérables grâce à l'implantation de milliers de petites antennes à commande de phase en Australie et de 197 antennes paraboliques de 15 mètres de diamètre en Afrique du Sud. En combinant les signaux de toutes les antennes au moyen de superordinateurs, on pourra simuler un télescope géant couvrant une grande partie de la surface terrestre (jusqu'à 3000 km).

Les quantités de données qui seront générées par les télescopes de SKAO sont de l'ordre de l'exabyte, soit environ dix fois plus que le CERN. Le stockage et l'exploitation de tels volumes de données nécessitent d'importantes ressources et, surtout, de nouvelles méthodes de traitement. Les chercheurs qui travaillent dans les hautes écoles de Suisse se consacrent à ces problématiques depuis une décennie déjà ; ils sont mis à contribution au SKAO pour y apporter leurs solutions.

Les installations sud-africaines et australiennes seront pilotées depuis le site de Jodrell Bank, au Royaume-Uni. SKAO sera réalisé en plusieurs phases, en commençant par sa première configuration «SKA-1», déployée et progressivement mise en service entre 2021 et 2030.

La Suisse se positionne en astronomie multi-messager

La participation suisse à SKAO répond aux besoins de spécifiques la communauté de recherche suisse en radioastronomie et aux besoins généraux de la recherche helvétique en astrophysique. Elle constitue un élargissement naturel de la participation suisse à des organisations internationales exploitant des télescopes au sol. Grâce à la participation à SKAO, à ESO et à CTAO, les scientifiques suisses auront accès à des données couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique et pourront ainsi réaliser des projets de recherche de pointe dans le domaine de l'astronomie multi-messager.

En Suisse, plus de 50 scientifiques travaillent dans différentes institutions sur des projets en lien avec SKAO. Des contributions majeures sont apportées dans le développement de matériel informatique, par exemple pour le stockage de grande capacité et la mise au point de puces qui transforment des signaux analogiques en signaux numériques. De même, la recherche suisse est aux avant-postes dans le développement de logiciels : de nouvelles méthodes pour compresser et extraire les données et des solutions d'intelligence artificielle sont mises au point pour être appliquées aux données de SKAO.

Cherenkov Telescope Array Observatory CTAO

Le Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO) a pour objectif d'observer la lumière à ondes courtes provenant de l'espace à l'aide de télescopes terrestres. L'observation des flashes Tcherenkov dans l'atmosphère permet d'étudier indirectement les rayons gamma émis par les galaxies et les supernovas lointaines. Le vaste plan de recherche prévu pour l'exploitation de CTAO a pour objectif de répondre aux grandes questions de l'astrophysique, de la physique des particules et, à l'intersection de ces domaines, de la physique des astroparticules.

Année de fondation	2023 (prévision)
Pays et organisations impliqués	Australie, Allemagne, Autriche, République tchèque, France, Italie, Japon, Pologne, Slovaquie, Espagne, Suisse, Royaume-Uni, ESO
Forme juridique	European Research Infrastructure Consortium (ERIC)
État siège	Italie
Sites d'implantation	Bologne (Italie, quartiers généraux) Berlin (Allemagne, Science Data Management Centre) Paranal (Chili) La Palma (Canaries, Espagne)
Domaines de recherche	Astronomie, astrophysique, physique des particules, physique des astroparticules
Budget de construction	331.3 millions d'euros
Statut de la Suisse	Observateur fondateur
Taux de contribution de la Suisse	0.2 %
Site internet	www.cta-observatory.org/



Explorer les environnements les plus extrêmes de l'univers

CTAO sera le plus grand observatoire au monde dédié à la spectroscopie gamma terrestre. Grâce à des télescopes ultrasensibles dix fois plus performants que les télescopes actuels, les installations de CTAO permettront d'observer les rayons gamma à haute énergie avec une précision sans précédent. Par rapport aux autres projets actuels, CTAO couvrira un champ angulaire et une surface d'observation étendus grâce à plus de 60 télescopes situés sur deux sites situés respectivement dans l'hémisphère nord et dans l'hémisphère sud.

Les rayons gamma constituent la forme la plus énergétique du rayonnement électromagnétique. Les sources de rayons gamma sont des régions de l'univers où les particules subatomiques reçoivent beaucoup d'énergie et que l'on nomme « accélérateurs cosmiques ». Il s'agit généralement d'environnements où se produisent des événements extrêmes tels que des explosions, des éruptions ou de puissants faisceaux de particules à proximité de trous noirs supermassifs.

La mesure des rayons gamma depuis la Terre ne se fait que de manière indirecte, car ils sont entièrement bloqués par notre atmosphère. Lorsque les rayons gamma frappent notre atmosphère, de nouvelles particules sont créées et leur accélération émet une faible lumière bleue, la « lumière Tcherenkov ». Les télescopes de CTAO exploitent cet effet pour étudier l'énergie, la direction et même la source des rayons gamma.

CTAO explorera l'origine et le rôle des particules cosmiques relativistes, les environnements extrêmes de notre univers et les limites les plus récentes de la physique. Les cibles d'observation sont les centres galactiques, le Grand nuage de Magellan, les régions de formation d'étoiles et de galaxies, ainsi que les amas de galaxies. Les applications scientifiques vont de l'astrophysique des hautes énergies à la cosmologie en passant par la physique des particules élémentaires. CTAO permettra par conséquent la collaboration et les échanges entre les chercheurs de ces différents domaines.



Rendu artistique des trois catégories de télescopes CTAO qui seront installés dans de l'hémisphère sud à l'Observatoire du Paranal de l'ESO. Illustration: Gabriel Pérez Diaz (IAC) / Marc-André Besel (CTAO) / ESO / N. Risinger (skysurvey.org)

CTAO établira ses infrastructures sur trois continents

Les travaux préparatoires à l'établissement et à la construction de CTAO sont effectués depuis 2016 à Bologne. Bologne accueillera le siège de CTAO une fois l'organisation formellement établie. La coordination scientifique des campagnes expérimentales et le traitement des données seront assurés par le Science Data Management Centre (SDMC) situé à Berlin. La quantité de données à traiter sera immense : près de 100 pétaoctets sont attendus d'ici 2030. Cet énorme volume de données pose de grands défis informatiques qui nécessiteront de nouveaux développements dans le domaine de la gestion des données.

Après une évaluation approfondie des sites des hémisphères nord et sud, CTAO a choisi ceux de La Palma aux îles Canaries et de Paranal au Chili pour y implanter ses télescopes. Les télescopes de La Palma observeront les rayonnement gamma de basse et moyenne énergie. Quatre grands télescopes de 23 m de diamètre et neuf télescopes moyens de 11,5 m de diamètre sont prévus à cet effet. Ce site sera donc principalement dédié à l'observation de phénomènes physiques extragalactiques.

Dans l'hémisphère sud, les télescopes de CTAO seront situés à proximité immédiate du site de l'ESO dans le désert d'Atacama. Les observations qui y seront réalisées se concentreront principalement sur le rayonnement gamma de moyenne et haute énergie. Pas moins de 14 télescopes de taille moyenne et 37 petits télescopes de respectivement 11,5 m et 4,3 m de diamètre seront installés sur une

surface de plus de 3 kilomètres carrés. Dans une étape ultérieure, quatre télescopes de grande taille doivent également y être installés.

Vers cinq années de construction

L'entrée en vigueur de la structure juridique établissant CTAO en tant qu'organisation est attendue en 2023. Ce moment marquera le début de la phase de construction et d'exploitation de CTAO. Les travaux de construction prévoient dans un premier temps la mise en place de l'infrastructure puis, dans un deuxième temps, l'installation des télescopes. Il est en outre prévu que les phases de construction se déroulent en parallèle dans l'hémisphère nord et dans l'hémisphère sud. Les premières observations sont attendues environ cinq ans plus tard (2028).

CTAO représentent de multiples opportunités pour la Suisse

Depuis le début des années 2000, les universités de Zurich et de Genève ainsi que l'EPFZ participent au projet CTA au sein du Consortium CTA, responsable des travaux de conception préalables à la construction de l'infrastructure. En raison de la position privilégiée qu'elle occupe dans la conception du projet, l'Université de Genève a pris, au début de l'année 2020, avec le soutien de la Confédération, la direction des efforts pour consolider la future base d'utilisateurs suisses, étape nécessaire à une éventuelle future adhésion de la Suisse à CTAO European Research Infrastructure Consortium (ERIC).

La Suisse mène des recherches de pointe dans le domaine de la physique des astroparticules. La communauté scientifique suisse porte un intérêt majeur à CTAO et est particulièrement bien placée pour y apporter des contributions déterminantes dans le domaine de l'instrumentation et du traitement des données. Par exemple, l'EPFZ développe des caméras pour les télescopes de CTAO et l'EPFL a de l'expérience dans la construction de robots pour le positionnement des télescopes.

Au-delà de son seul intérêt pour la physique des particules et l'astronomie, CTAO présente un énorme intérêt scientifique pour la Suisse et le reste du monde, d'une part pour ce qui est des techniques de production et d'analyse de données (y compris l'apprentissage automatique et les techniques modernes d'imagerie), mais d'autre part également pour l'établissement de contacts avec des secteurs spécialisés susceptibles de participer à la construction de télescopes.

Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL)

Le Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL) compte parmi les meilleurs établissements de recherche au monde dans le domaine des sciences de la vie. Réparti sur six sites en Europe, il encourage la collaboration dans la recherche fondamentale en biologie moléculaire. Dans ce but, il met à disposition les infrastructures nécessaires, comme des microscopes ultraperformants ou des banques de données, et participe au développement continu d'une instrumentation de pointe au service de la biologie moderne.

Année de fondation	1974
Membres	Allemagne, Autriche, Belgique, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Israël, Italie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Monténégro, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie, Suède, Suisse
Forme juridique	Organisation de droit international public
État siège	Allemagne
Sites d'implantation	Heidelberg (D), Hinxton (GB), Grenoble (F), Hambourg (D), Rome (I), Barcelone (E)
Domaine de recherche	Sciences de la vie
Budget annuel	334 millions d'euros
Statut de la Suisse	Membre
Taux de contribution de la Suisse	1,7 %
Site internet	www.embl.org



Promouvoir la biologie moléculaire au niveau international

L'EMBL se concentre principalement sur la recherche fondamentale en biologie moléculaire. Il s'engage pour le développement technologique, la formation et la formation continue des chercheurs et accorde une attention particulière à la relève scientifique.

L'EMBL encourage la recherche en biologie moléculaire à travers de nombreux projets lancés en collaboration avec les laboratoires des pays membres. Ces projets recouvrent de nombreux domaines de recherche allant de la biologie cellulaire et de la biologie du développement à l'immunologie en passant par la biologie structurale. Dans le cadre de son nouveau programme stratégique «Des molécules aux écosystèmes», EMBL explore de nouveaux domaines tels que la biologie planétaire. Cette nouvelle discipline vise l'étude des individus, des populations ou encore des écosystèmes à partir de paramètres moléculaires et aborde également certaines questions sociétales relatives à la santé de notre planète. Aujourd'hui, les bases de données de l'EMBL constituent une ressource incontournable

pour les scientifiques spécialisés dans les sciences de la vie et la biomédecine : le site web de l'organisation enregistre chaque jour près de 65 millions de demandes. Les connaissances acquises dans les différents domaines tels que la spectrométrie, la microscopie ou encore la cristallisation des protéines ont conduit à plus de 1000 inventions et 450 brevets. En conséquence, des sociétés spin-off sont régulièrement créés.

Active sur six sites en Europe

L'EMBL est réparti sur six sites en Europe :

- Heidelberg (Allemagne) : le siège principal compte 800 collaborateurs et près de 50 groupes de recherche y mènent leurs activités. Il propose différents services scientifiques aux chercheurs dans des domaines comme la génomique, la protéomique ou la biologie chimique. Depuis 2022, le campus abrite le centre d'imagerie de l'EMBL, une infrastructure de pointe qui réunit les technologies d'imagerie les plus modernes, y compris celles qui ne sont pas encore disponibles commercialement. Les acteurs de la recherche et de



EMBL se compose de six sites répartis dans toute l'Europe. Le siège principal se trouve à Heidelberg. Photo: EMBL

l'industrie y trouvent différents microscopes pour la microscopie optique, la microscopie à fluorescence ou encore la cryo-microscopie électronique.

- Hinxton (Cambridge, Royaume-Uni) : l'Institut européen de bio-informatique (EMBL-EBI) compte 850 collaborateurs et propose des outils de gestion des données et de bio-informatique en libre accès. Leader mondial en bio-informatique, il est devenu le site le plus important de l'EMBL et accueille l'un des nœuds du réseau d'infrastructures de recherche européennes ELIXIR.
- Grenoble (France) : spécialisé dans le domaine de la biologie structurale, le site français de l'EMBL travaille en étroite collaboration avec l'Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF) et l'Institut Laue-Langevin (ILL), deux instituts avec lesquels il partage le même campus.
- Hambourg (Allemagne) : le second site allemand de l'EMBL est installé sur le même site que le Deutsches Elektronen-Synchrotron (synchrotron à électrons allemand), l'associé principal de l'installation European XFEL. À l'instar du site de Grenoble, il est spécialisé dans la biologie structurale.
- Monterotondo (Rome, Italie) : les champs de recherche principaux du site italien sont la neurobiologie et

l'épigénétique, qui étudie les changements des organismes résultant de changement dans l'expression de certains gènes.

- Barcelone (Espagne) : la biologie des tissus et la modélisation des maladies forment le cœur des activités du site le plus récent de l'EMBL (ouvert en 2017). Il s'agit du site qui se concentre le plus sur l'être humain et sa santé.

La cryo-microscopie électronique mène au prix Nobel de chimie

En 2017, le professeur émérite en biophysique, Jacques Dubochet, s'est vu décerner le Prix Nobel de chimie pour son travail révolutionnaire à EMBL concernant la mise au point de la cryo-microscopie électronique. Cette technique consiste à observer les échantillons biologiques à des températures en dessous de -150°C à l'aide d'un microscope électronique, ce qui permet de conserver la structure biologique des échantillons à leur état natif, sans que l'eau s'évapore.

Grâce à l'EMBL, les chercheurs suisses ont à leur disposition une infrastructure d'une qualité exceptionnelle. Ils dépendent particulièrement des bases de données d'EMBL-EBI pour mener à bien leurs activités de recherche.

Laser européen à électrons libres et à rayons X (European XFEL)

Entrée en service en 2017, l'installation de recherche European XFEL produit des impulsions lumineuses très intenses et extrêmement brèves dans le domaine des rayons X. Elle permet d'obtenir des images de détails atomiques de virus, de déterminer la composition moléculaire de cellules, d'observer le monde nanocosmique ou de filmer les réactions physico-chimiques et biologiques. Cette installation souterraine proche de Hambourg, à Schenefeld (Allemagne), offre des possibilités uniques au monde pour la recherche de pointe.

Année de fondation	2009
Membres	Allemagne, Danemark, Espagne, France, Hongrie, Italie, Pologne, Royaume-Uni, Russie, Slovaquie, Suède, Suisse
Forme juridique	Convention de droit international public ; entreprise privée de droit allemand
État siège	Allemagne
Site d'implantation	Schenefeld (Allemagne)
Domaine de recherche	Sciences des matériaux, chimie et biochimie
Budget annuel	145,7 millions d'euros
Statut de la Suisse	Membre
Contribution suisse	1,47%
Site internet	www.xfel.eu



Etudier le cœur de la matière grâce à un laser à rayons X hors normes

European XFEL est le plus grand laser à rayons X au monde. Cette source de rayonnement synchrotron de 4^e génération basée sur un accélérateur linéaire est destinée à l'étude scientifique de matériaux et de processus chimiques ou biochimiques jusqu'à l'échelle des atomes. Les sources de rayonnement synchrotron sont de grandes installations dont la finalité d'utilisation peut être comparée à celle des microscopes ordinaires. Le rayonnement qu'elles produisent et utilisent permet cependant de visualiser des structures beaucoup plus petites que ne le permet un microscope optique.

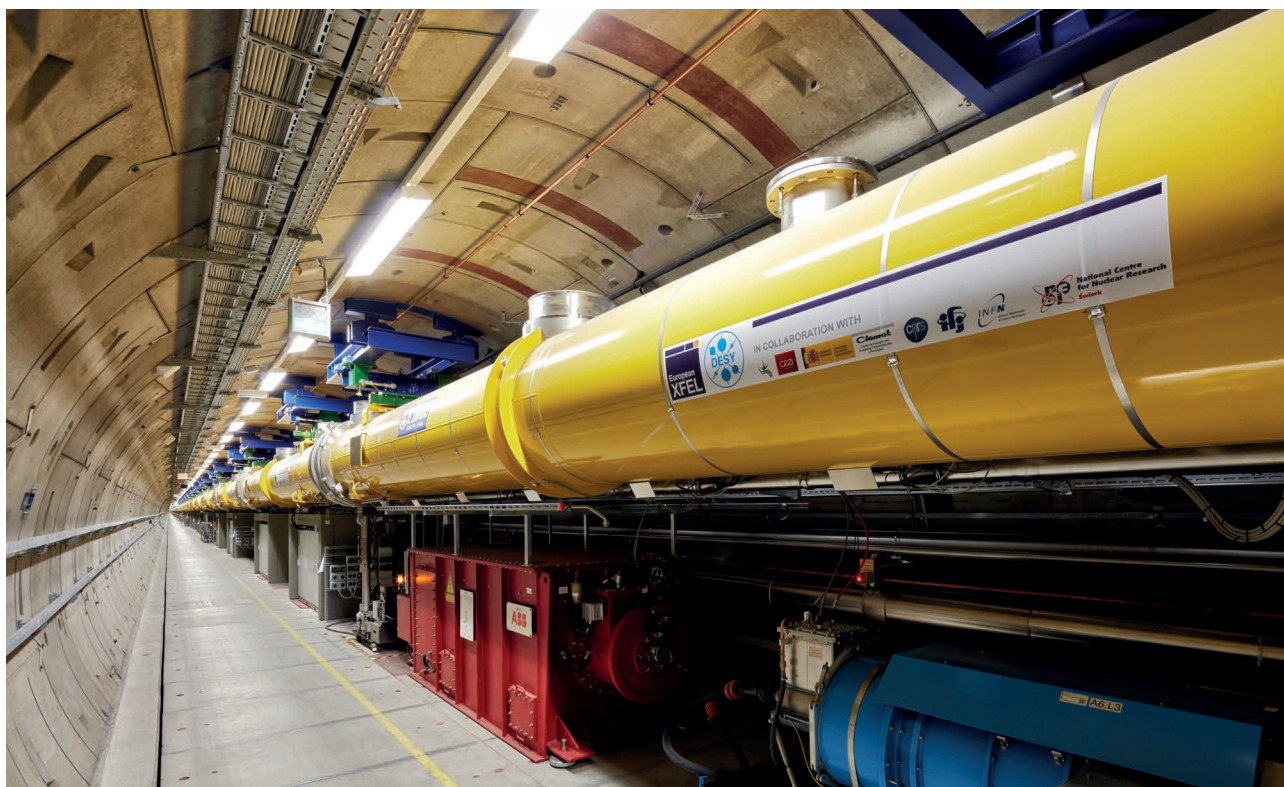
Grâce aux rayons X de European XFEL, les chercheurs peuvent déchiffrer les détails atomiques de virus et de cellules, produire des images tridimensionnelles de nanostructures et étudier des processus tels qu'ils se déroulent à l'intérieur de planètes ou d'étoiles. L'installation est mise à profit dans les domaines des sciences naturelles les plus variés : biologie, médecine, pharmacie, chimie, sciences

des matériaux, physique, astrophysique, recherche énergétique, recherche environnementale, électronique, nanotechnologie, et photonique.

Une résolution temporelle de quelques femtosecondes
Le laser à rayons X est placé dans des tunnels. D'une longueur totale de 2,1 kilomètres, dont 1,7 kilomètre dédié à l'accélérateur, European XFEL est l'accélérateur linéaire supraconducteur le plus long au monde.

Il produit bien plus d'impulsions lumineuses par seconde que n'importe quelle autre installation de recherche. Les impulsions lumineuses émises sont très intenses et extrêmement brèves. Elles relèvent généralement de l'ordre de quelques femtosecondes, soit des milliardièmes de seconde. Ces propriétés exceptionnelles permettent de filmer des processus ultra-rapides lors de réactions chimiques ou des modifications au sein de biomolécules.

Pour produire des rayons X, les électrons sont d'abord accélérés par paquets et ainsi portés à un niveau d'énergie



European XFEL produit 27 000 flashes de rayons X par seconde au moyen de l'accélérateur : une performance unique au monde.
Photo : European XFEL/Heiner Müller-Elsner

élevé. Lorsque le niveau d'énergie est suffisant, les particules sont déviées à travers une série d'aimants ordonnés de façon spécifique de sorte à onduler et émettre des rayons X. Les ondateurs amplifient ensuite ces rayons afin d'obtenir des impulsions de la durée et de l'intensité désirée.

Les rayons X de European XFEL alimentent différentes stations de mesure permettant ainsi aux scientifiques de réaliser des expériences très variées. Fondamentalement, la structure des expériences reste la même : à l'aide d'éléments optiques tels que des miroirs, des grilles, des fentes ou des cristaux, il est possible d'étendre, d'assembler, de filtrer ou de réduire les faisceaux de rayons X en fonction des besoins. Dans les stations expérimentales, les échantillons à analyser interagissent avec les rayons X. Le produit de ces interactions est enregistré par des détecteurs spéciaux et les données qui en résultent sont préparées en vue de leur analyse.

Synergies avec SwissFEL

En raison du petit nombre d'installations FEL et des possibilités novatrices qu'elles offrent, la demande des chercheurs du monde entier, déjà très forte, ne cesse de croître. C'est pourquoi la Suisse d'une part participe à European XFEL et, d'autre part, a construit une installation nationale

du même type (SwissFEL) à l'Institut Paul Scherrer (PSI). Les deux installations sont complémentaires : au sein de SwissFEL, les scientifiques peuvent mener des expériences qui ne sont pas réalisables à European XFEL et inversement. En outre, il est possible de préparer à SwissFEL des expériences de recherche pour European XFEL, permettant aux utilisateurs de SwissFEL d'avoir une longueur d'avance. La construction partiellement simultanée des deux installations a donné lieu à d'importantes synergies. Le PSI a en particulier pu jouer un rôle important dans la conception et la construction de European XFEL et en tirer parti pour la construction de SwissFEL.

En Suisse, la participation à European XFEL ne bénéficie cependant pas uniquement aux scientifiques, mais également à l'industrie de haute technologie. L'économie suisse profite ainsi d'un marché de niche. Par exemple, des entreprises helvétiques ont mis au point des détecteurs de rayons X totalement uniques. Le retour industriel lié à la participation à European XFEL était déjà significatif durant toute la construction de l'infrastructure ; il devrait se poursuivre lors de son exploitation. L'industrie suisse profite également de la participation à European XFEL en tant qu'utilisatrice des installations, qui permettent par exemple à des entreprises pharmaceutiques de développer des médicaments.

Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF)

Implantée à Grenoble (France), l'Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF) est l'une des sources de lumière les plus puissantes au monde. Grâce au programme d'amélioration Extremely Brilliant Source EBS, des rayons X d'une brillance et d'une cohérence inégalées offrent aux chercheurs issus de multiples disciplines des possibilités radicalement nouvelles pour l'étude de la matière jusqu'au niveau subatomique.

Année de fondation	1988
Membres	Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Italie, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni, Russie, Suède, Suisse
Forme juridique	Traité international ; société civile de droit français
État siège	France
Sites d'implantation	Grenoble (France)
Domaines de recherche	Biologie structurale, sciences des matériaux, structure électronique, magnétisme et dynamique, matériaux soumis à des conditions extrêmes, systèmes complexes et biomédecine, recherche en rayons X, patrimoine culturel
Budget annuel	120 millions d'euros
Statut de la Suisse	Membre
Taux de participation suisse	4 %
Site internet	www.esrf.fr



Les rayons X au service de la science

Fondée en 1988, ESRF a pour mission, d'une part, d'exploiter l'une des plus puissantes sources de rayonnement synchrotron du monde et, d'autre part, de conduire ses propres recherches dans le domaine des rayons X. Grâce à la brillance et à la qualité de sa source de 4^e génération, ESRF met à disposition de ses membres un «super microscope», qui permet de révéler la structure de la matière dans toute sa complexité. ESRF offre ainsi aux scientifiques des outils inégalés pour l'exploration des matériaux et de la matière vivante, de la physique à l'archéologie en passant par la biologie structurale ou encore la santé et les sciences de la vie.

Les recherches conduites par ESRF dans le domaine des rayons X ont notamment permis le développement de la technologie nécessaire au déploiement de la quatrième génération de sources de rayonnement synchrotron ultrabrillant, tant sous forme de synchrotron que de laser à électrons libres (voir European XFEL).

Dix billions de fois plus brillants que les rayons X médicaux

ESRF est la plus intense des sources de rayonnement synchrotron au monde, avec des rayons X dix billions de fois plus brillants que les rayons X utilisés dans les hôpitaux. Ces rayons X aux propriétés exceptionnelles sont produits à partir d'électrons accélérés à de très hauts niveaux d'énergie et injectés dans un anneau de stockage de 844 m de circonférence. L'énergie accumulée est ensuite libérée sous forme de rayons X qui s'échappent de l'anneau en direction de 40 stations expérimentales.

Appelées aussi «lignes de lumière», ces stations sont spécialisées et équipées d'instruments à la pointe de la technologie. Fonctionnant en continu, elles sont utilisées non seulement par des scientifiques universitaires, mais aussi par des entreprises basées dans les pays membres et associés à ESRF.



Des rayons X aux propriétés exceptionnelles sont produits à ESRF par des électrons de très haute énergie circulant dans un anneau de stockage, un tunnel circulaire de 844 m de circonférence. Photo : ESRF/VUEDICI

ESRF a lancé en 2009 un ambitieux programme de modernisation prévoyant des investissements totaux de 330 millions d'euros. Une première phase, réalisée entre 2009 et 2015, visait à améliorer l'instrumentation des lignes de lumière. La seconde phase, intitulée «Extremely Brilliant Source» (ESRF-EBS), a permis à ESRF de mettre en service en 2021 le plus puissant anneau de stockage jamais réalisé grâce à une technologie unique développée dans le cadre de son propre programme de recherche, confirmant son rôle de fer de lance dans le domaine des radiations synchrotron.

Excellence et réactivité pour des résultats de premier plan

Le Prix Nobel de chimie 2012 a été attribué à Robert Lefkowitz et Brian Kobilka pour leurs travaux sur les sites d'amarrage présents sur la paroi cellulaire. Le Prix Nobel de chimie est allé en 2009 à Venki Ramakrishnan, Ada Yonath et Thomas A. Steitz pour leurs travaux sur les ribosomes. Tous ont régulièrement recourus aux instruments d'ESRF pour leurs recherches.

Plus récemment, ESRF a apporté d'importantes contributions à la compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'action du COV-SARS-2 et de son impact sur les organes humains, notamment en fournissant la première image d'un poumon complet de patient à une échelle de 5 microns (0,005 mm).

Un partenariat fort avec la Suisse

La Suisse est membre fondateur d'ESRF. Les chercheurs d'une vingtaine d'institutions de recherche suisses utilisent régulièrement ESRF, qui leur octroie entre 3,5 et 4 % du temps de rayon disponible. L'instrumentation disponible à ESRF complète les installations de l'Institut Paul Scherrer, qui exploite lui aussi une source de radiation synchrotron, la «Swiss light source», ainsi qu'un laser à électrons libre, le «SwissFEL».

En 2017, des chercheurs de l'Université de Berne ont développé en collaboration avec des chercheurs français une nouvelle méthode qui permet de mieux traiter les tumeurs cérébrales. En recourant à l'infrastructure d'ESRF, l'équipe de recherche a pu établir que la chimiothérapie était plus efficace en combinaison avec une radiothérapie par microfaisceaux (Microbeam Radiation Therapy, MRT) plutôt qu'une radiothérapie conventionnelle. Cette procédure facilite «l'acheminement» des médicaments vers le tissu tumoral en rendant les zones concernées plus réceptives.

Les recherches menées à ESRF profitent également à l'économie suisse. De nombreuses entreprises suisses livrent des composants de haute technologie et des services de pointe à ESRF. La Suisse se distingue notamment dans les domaines des guides de précisions, mais aussi et surtout dans le domaine des détecteurs, puisque pas moins de 15 nouveaux détecteurs développés et produits en Suisse ont été installés sur les lignes de lumières d'ESRF entre 2019 et 2021.

Institut Laue-Langevin (ILL)

Implanté à Grenoble (France), l'Institut Laue-Langevin (ILL) est à la pointe de la science et de la technologie neutroniques depuis 1967. Il héberge le réacteur à haut flux (HFR), qui est actuellement la source de neutrons la plus puissante au monde destinée à la recherche. Les neutrons sont utilisés en physique, en chimie, dans la recherche sur les matériaux et l'énergie, en biologie et en médecine, ainsi que dans la recherche en archéologie et en histoire de l'art.

Année de fondation	1967
Membres permanents	Allemagne, France, Royaume-Uni
Membres scientifiques	Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Italie, Pologne, Slovaquie, Suède, Suisse, République tchèque
Forme juridique	Traité international ; société civile de droit français
État siège	France
Sites d'implantation	Grenoble (France)
Domaines de recherche	Science des matériaux, physique des solides, chimie, cristallographie, biologie moléculaire, magnétisme, physique nucléaire, neutronique et fondamentale
Budget annuel	100 millions d'euros
Statut de la Suisse	Membre scientifique
Taux de contribution de la Suisse	2,4 %
Site internet	www.ill.eu



Les neutrons au service de la science et de la société

L'Institut Laue-Langevin (ILL) est un centre international de premier plan dédié aux sciences et technologies neutroniques. En tant qu'institut de service, l'ILL met une puissante source de neutrons à la disposition des chercheurs des États membres permanents et des pays partenaires dans le domaine scientifique (membres scientifiques).

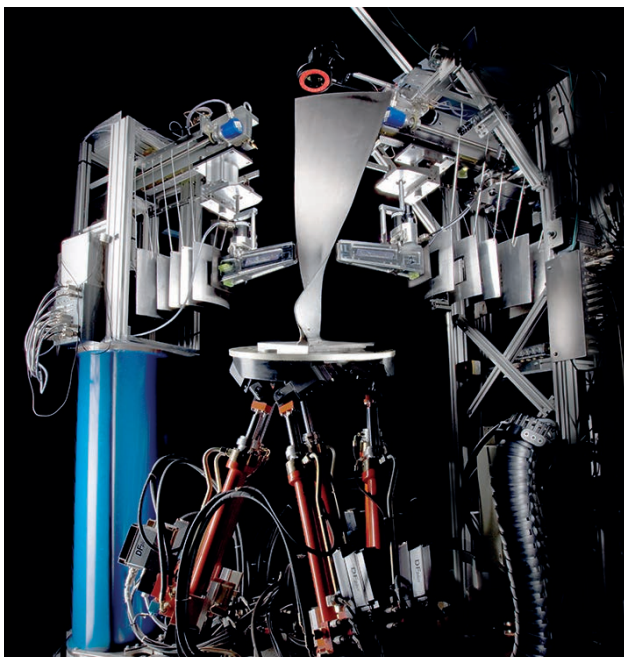
Électriquement neutres, les neutrons pénètrent au cœur de la matière, y compris des métaux, et permettent d'y déterminer la position des atomes et d'en évaluer le mouvement. En plus, leur propre moment magnétique élémentaire permet d'étudier les caractéristiques magnétiques à l'échelle atomique et subatomique des éléments. Les faisceaux de neutrons révèlent des propriétés de la matière qui demeurent inaccessibles par d'autres méthodes.

Le réacteur à haut-flux de l'ILL apporte également une contribution significative à la production de radioisotopes innovants destinés à la recherche clinique contre le cancer.

38 stations expérimentales actives 170 jours par année

Le réacteur à haut flux constitue le cœur de l'ILL. Il est disponible chaque année durant trois cycles de réacteur, soit un total de 170 jours par an. Le réacteur alimente en neutrons trente-huit instruments de pointe qui se répartissent en cinq groupes: instruments de diffraction, structures de grande envergure, spectroscopes, instruments de physique nucléaire et physique des particules et instruments de collaboration.

Parmi les instruments de diffraction, le diffractomètre SALSA permet de mesurer les déformations internes de divers matériaux. Ces mesures sont notamment importantes pour les aspects de sécurité dans le domaine de l'industrie aéronautique et spatiale. Le spectromètre THALES permet, quant à lui, d'étudier le comportement de supraconducteurs non-conventionnels et les matériaux quantiques. Très demandés par les chercheurs suisses, ces instruments seront améliorés en collaboration avec l'Institut Paul Scherrer.



SALSA est un diffractomètre qui permet de mesurer les déformations internes de divers matériaux. Ces mesures sont notamment importantes pour les aspects sécuritaires dans l'industrie aéronautique et spatiale. Photo: ILL

Rester au plus haut niveau durant plus de 50 ans

Des recherches étant menées à l'ILL depuis 1972, les installations sont régulièrement mises à niveau. À cet effet, un programme en deux phases intitulé Millenium a été réalisé entre 2000 et 2018, chaque phase étant financée à hauteur de 40 millions d'euros. Le programme s'est achevé avec la mise en service du WASP, un spectromètre grand angle à écho de spin.

Lancé en 2016, le programme Endurance vise à garantir la compétitivité scientifique de l'ILL jusqu'à la fin de la décennie actuelle. Estimés à 22 millions d'euros, les travaux devraient prendre fin en 2023 de sorte à ce que l'ILL réponde aux besoins de la recherche européenne avant qu'un terme ne soit finalement mis à son exploitation vers 2030. Les utilisateurs de l'ILL pourront alors se tourner vers ESS, dont les caractéristiques offriront des possibilités radicalement nouvelles.

Des résultats scientifiques exceptionnels

Grâce aux instruments de l'ILL, des chercheurs ont par exemple identifié en 2017 la structure de la protéine p7, essentielle à la libération du virus de l'hépatite C. Il s'agit d'une découverte décisive pour le développement de médicaments correspondants, dont bénéficient aujourd'hui des millions de personnes. En 2021, une collaboration entre l'ILL et l'Institut Paul Scherrer a permis d'identifier le terbium, une famille de radioisotopes particulièrement prometteurs dans la lutte contre différents types

de tumeurs. Les premiers résultats obtenus permettent d'envisager des études cliniques à large échelle.

Une filière d'excellence en Suisse

La Suisse est un acteur majeur de la recherche basée sur les neutrons en Europe et dans le monde. Elle participe à l'exploitation de l'ILL depuis 1988 en qualité de membre scientifique sur la base de contrats de durée limitée de 5 ans. L'excellence des recherches qu'elle y conduit, notamment dans l'étude du magnétisme, y est régulièrement saluée et a permis d'obtenir en moyenne env. 4,6 % du temps de faisceau mis à disposition par l'ILL depuis 2014.

La collaboration scientifique entre la Suisse et l'ILL est complétée par différents projets de recherche et développement conduits conjointement entre l'ILL et l'Institut Paul Scherrer dans les domaines de l'instrumentation, des échantillons ainsi que de la production de radio-isotopes pour la médecine. L'industrie suisse bénéficie des opportunités commerciales offertes par l'ILL dans les domaines des hautes technologies, notamment dans le domaine des guides de neutrons.

L'intérêt des faisceaux de neutrons pour un éventail très large de disciplines scientifiques a conduit la Suisse à mettre en service en 1996 à l'Institut Paul Scherrer sa propre source de neutrons nationale, SINQ. Complétant les possibilités offertes par l'ILL, la source de spallation SINQ s'est depuis imposée comme l'une des quatre sources principales au niveau européen. Afin de garantir à long-terme la compétitivité suisse dans cette filière d'excellence, la Suisse a adhéré en 2015 à la Source de spallation européenne ESS-ERIC qui offrira, à terme, les faisceaux de neutrons les plus brillants au monde.

La Suisse se distingue ainsi dans le domaine des neutrons à la fois par l'excellence de sa communauté d'utilisateurs, sa contribution à l'offre de temps de faisceau en Europe et par sa qualité de centre de compétence majeur dans les sciences et technologies sous-jacentes à l'exploitation scientifique des neutrons.

Source européenne de spallation (ESS)

La Source européenne de spallation (ESS) est une installation de recherche en cours de construction à Lund (Suède). Elle est appelée à devenir la source de neutrons la plus puissante au monde destinée à l'étude des matériaux. N'interagissant pas avec l'enveloppe électronique des atomes, les neutrons permettent d'étudier avec précision la structure et la dynamique des noyaux atomiques au cœur de la matière. L'exploitation de faisceaux de neutrons donne accès à des phénomènes qui restent invisibles aux techniques basées sur les rayons X ou la cryo-microscopie.

Année de fondation	2015
Membres	Allemagne, Danemark, Espagne, Estonie, France, Hongrie, Italie, Norvège, Pologne, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse
Forme juridique	Consortium pour une infrastructure européenne de recherche (European Research Infrastructure Consortium ; ERIC)
États sièges	Suède, Danemark
Sites d'implantation	Lund (Suède) ; Copenhague (Danemark)
Domaines de recherche	Sciences des matériaux, sciences de la vie, physique de l'énergie et physique fondamentale, entre autres
Coûts de construction	1843 millions d'euros
Statut de la Suisse	Membre
Contributions de la Suisse (2015–2028)	135 millions de francs
Site internet	www.europeanspallationsource.se



Des faisceaux d'un niveau de brillance inégalé

Capable de produire des faisceaux de neutrons d'une brillance jusqu'à 100 fois plus élevée que celle des faisceaux générés par les installations actuelles, la Source européenne de spallation (ESS) ouvrira une nouvelle ère de la recherche utilisant des faisceaux de neutrons pour l'étude de la structure la plus intime de la matière et des lois qui la régissent.

Elle offrira alors des possibilités uniques pour la recherche fondamentale comme pour la recherche appliquée. Qu'il s'agisse de passer au crible des artefacts archéologiques ou des composants métalliques, d'analyser des processus biomoléculaires, de comprendre la structure électronique et la dynamique de supraconducteurs d'un genre nouveau ou de rechercher les causes de la violation de la parité en physique des particules élémentaires, ESS apportera une contribution majeure aux développements scientifiques contemporains.

Une source de spallation d'un genre nouveau

Alors que les sources de première génération telles que l'ILL utilisent un réacteur nucléaire produisant un flux constant de neutrons, ESS exploitera une source dite de «spallation», dont les performances uniques seront générées par l'un des accélérateurs linéaires de protons les plus puissants au monde. Produits à partir d'un gaz d'hydrogène chauffé par micro-ondes, les protons y seront accélérés pour atteindre 96 % de la vitesse de la lumière avant d'entrer en collision avec une cible de tungstène pour en arracher des neutrons. Ceux-ci seront ensuite ralentis et guidés vers une quinzaine d'instruments conçus à la fois pour tirer le meilleur parti de l'intensité et de la durée des impulsions délivrées par ESS, et pour répondre aux besoins d'utilisateurs issus d'horizons scientifiques très différents. Ainsi, en lieu et place d'un flux constant de moyenne intensité, ESS produira de brefs flashes de neutrons d'une intensité inégalée.

En construction depuis 2014, ESS devrait accueillir ses premiers utilisateurs en 2028 sur le site de Lund, en Suède. Le Data Management & Software Center est quant à lui installé de l'autre côté du détroit d'Øresund, à Copenhague.



Vue aérienne du site de construction d'ESS à Lund (Suède).
Photo: ESS

L'expertise suisse au service d'ESS

Forte de l'expérience accumulée en tant que membre scientifique de l'Institut Laue-Langevin et grâce à l'exploitation par l'Institut Paul Scherrer (PSI) de la source de spallation SINQ, la Suisse a été associée dès les premières heures aux travaux préparatoires préalables au démarrage de la construction d'ESS. Sur la base de la décision de l'Assemblée fédérale du 20 mars 2015, la Suisse est aujourd'hui engagée dans la réalisation d'ESS à hauteur de 3,5 % des coûts totaux, représentant un investissement financier total estimé à 135 millions de francs. La Suisse entend poursuivre sa participation dans le cadre de l'exploitation scientifique d'ESS une fois la construction terminée, garantissant ainsi à l'une de ses filières scientifiques d'excellence un accès à cette infrastructure à la pointe mondiale au cours des prochaines décennies.

Les institutions de recherche et les entreprises profitent déjà des opportunités offertes par la construction d'ESS, notamment car les statuts d'ESS prévoient qu'une partie significative des contributions des membres puisse être livrée «en nature». On entend par-là que les États membres s'engagent à préparer et à livrer des composants et des



Vue de l'intérieur d'un guide à neutrons qui transportera et conditionnera le faisceau de neutrons, conçu et construit au PSI avec le soutien de l'industrie suisse. Photo: Artur G. Glavic, PSI

logiciels ainsi qu'à fournir des services à l'organisation. La valeur de la contribution en nature est portée au crédit de la contribution des États membres. Le conseil de l'organisation pilote l'attribution des contributions en nature et en contrôle l'exécution. Outre l'accès à l'infrastructure de recherche, les contributions en nature permettent aux États membres d'impliquer leurs entreprises et leur industrie de haute technologie dans projet et de soutenir ainsi leur développement.

Un exemple de contribution en nature de la Suisse à la construction d'ESS est le réflectomètre ESTIA. La Suisse assume la responsabilité de la construction et de la livraison de cet instrument entièrement conçu par l'Institut Paul Scherrer (PSI). Une fois ESTIA mis en service, le montant des engagements restants de la Suisse envers la construction d'ESS sera réduit de la valeur attribuée par ESS à ESTIA, soit 11,3 millions d'euros. La Suisse entend payer 70 % de sa contribution obligatoire sous forme de contributions en nature. Cette solution lui permet ainsi de «conserver» une grande partie des moyens financiers dans le pays et d'en faire profiter la recherche et l'économie suisses.

Réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER)

La fusion nucléaire est la source d'énergie du Soleil. Il s'agit d'une réaction nucléaire où des noyaux atomiques très légers fusionnent pour former des noyaux plus lourds, libérant dans le même temps de l'énergie. En construisant le réacteur expérimental ITER, les pays participants veulent démontrer la faisabilité technique de la production d'énergie par la fusion nucléaire. S'ils y parviennent, une source d'énergie pratiquement inépuisable, qui ne nuit ni à l'environnement, ni au climat, sera alors à portée de main. Le réacteur expérimental est actuellement en construction à Cadarache, en France.

Année de fondation	2006
Membres	Chine, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Japon, Russie, Union européenne
Forme juridique	Organisation de droit international public
État siège	France
Site d'implantation	Cadarache (France)
Domaine de recherche	Fusion nucléaire
Site internet	www.iter.org

Développer une source d'énergie fiable, propre et durable

La source d'énergie du Soleil est la fusion nucléaire, une réaction dans laquelle des noyaux atomiques légers fusionnent pour former des noyaux plus lourds. La masse du nouveau noyau atomique étant inférieure à la somme des masses des noyaux initiaux, la différence est libérée sous forme d'énergie ; c'est le principe de l'équivalence énergie-masse formulé par Einstein.

Contrairement à la fission nucléaire, dont se servent encore les centrales nucléaires de la génération actuelle, la fusion nucléaire est extrêmement sûre et ne produit pas de déchets nucléaires à vie longue. En outre, elle ne nécessite que des ressources durables et bien réparties sur la planète. L'objectif de la recherche en fusion nucléaire est de développer la technologie permettant d'utiliser ce processus sur Terre. L'humanité disposerait ainsi d'une source d'énergie propre, écologique et inépuisable.

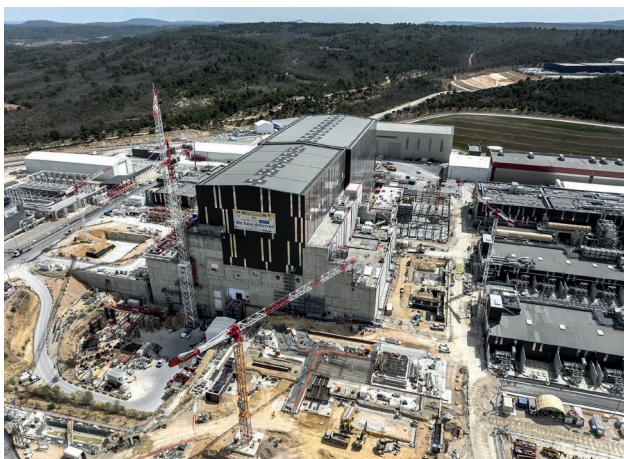
Le développement de la fusion nucléaire comme source d'énergie industrielle représente un défi scientifique, technologique et industriel majeur. Pour le surmonter, l'Union européenne, les États-Unis d'Amérique, le Japon, la Corée du Sud, la Chine, la Russie et l'Inde ont décidé en 2006 d'unir leurs forces. Ensemble, ces pays ont lancé le projet ITER en tant que projet de pointe d'envergure mondiale dans le domaine de la recherche en fusion nucléaire.

L'objectif du projet ITER est de construire un réacteur expérimental qui apportera la preuve qu'il est techniquement possible de produire sur Terre des quantités d'énergie substantielles à l'aide de la fusion nucléaire. ITER devra ainsi, à partir d'un apport de 50 MW d'énergie, produire jusqu'à 500 MW d'énergie sous forme de chaleur. Par ailleurs, ITER devra non seulement générer, mais aussi maintenir un plasma «brûlant», c'est-à-dire un plasma où l'énergie thermique dégagée par la réaction nucléaire permet à celle-ci de s'auto-entretenir. ITER devra aussi produire au sein même de sa chambre à vide l'un des combustibles nécessaires à la réaction, le tritium.

Un chantier pharaonique

Le réacteur expérimental de fusion thermonucléaire ITER est en construction depuis 2007. Il est prévu qu'il soit progressivement mis en service d'ici 2030. Au terme de cette phase, le premier plasma devrait pouvoir être généré. La réalisation des premières expériences nucléaires décisives est attendue pour 2035.

Au centre de l'installation ITER se trouve un tokamak, soit une chambre à vide de forme torique dans laquelle le plasma est confiné magnétiquement. C'est là que le plasma est généré et chauffé jusqu'à déclencher la réaction de fusion. Celle-ci devrait alors s'auto-entretenir et produire ainsi un solde positif d'énergie. Avec un rayon de plasma de 6,2 m et un volume de plasma de 840 m³, le tokamak ITER sera la



Vue aérienne du site de construction d'ITER à Cadarache (France). Le bâtiment central comprend le hall d'assemblage et le puits du tokamak. Photo: © ITER Organization

plus grande installation de ce type au monde. Le plasma généré atteindra une température de 150 millions de degrés. C'est dix fois plus que la température à l'intérieur du Soleil, où la force gravitationnelle très élevée permet le déclenchement de réactions de fusion à des températures plus basses que sur Terre. À l'inverse, les aimants supraconducteurs destinés à empêcher le plasma d'atteindre les parois de la chambre à vide devront être refroidis à une température proche du zéro absolu, soit $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le gradient de température qui en résultera sera très probablement le plus important du monde. En outre, il faudra 8000 t d'acier pour garantir un environnement sous vide fonctionnel dans la chambre à vide de $14\,000\text{ m}^2$. L'ensemble du chantier ITER couvre une superficie de 180 ha.

La direction générale du projet est assurée par ITER Organization. Les pays partenaires se sont entendus sur une infrastructure composée de onze parties distinctes. L'Union européenne en réalise cinq et les pays partenaires prennent chacun en charge l'une des parties restantes de la construction.

Afin de garantir que les connaissances et le savoir-faire acquis tout au long de la réalisation d'ITER soient diffusés au sein de l'ensemble des pays participants au projet, environ 90 % des contributions à ITER Organization sont livrées sous la forme d'équipements, de pièces et de services. Ainsi, toutes les parties impliquées seront capables de mettre sur pied leur propre industrie de fusion nucléaire.

La Suisse pionnière de la fusion nucléaire

Depuis la création dans les années 60 de l'actuel Swiss Plasma Center (SPC) à l'EPFL, la Suisse tient un rôle majeur dans le domaine de la recherche en fusion nucléaire. Elle met à disposition de cette dernière des compétences



À la demande de sociétés japonaises, l'entreprise suisse Nord-Lock AG a développé pour ITER des tendeurs à boulons multiples «Superbolt». Uniques, ils sont capables de résister aux charges opérationnelles et cycliques requises et de fonctionner à des températures avoisinant les $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, proches du zéro absolu. Photo: Swiss IKC Nord-Lock

mondialement reconnues et des installations uniques. Le SPC exploite le Tokamak à Configuration Variable (TCV), une installation exclusive dédiée à l'optimisation des performances des plasmas. Il apporte également des compétences de premier plan dans le domaine des systèmes de chauffage par rayonnement à micro-ondes. Par ailleurs, il teste sur son installation SULTAN tous les câbles supraconducteurs d'ITER. SULTAN est en effet l'unique installation à pouvoir valider les câbles supraconducteurs d'ITER. Enfin, le SPC apporte une contribution significative à la compréhension et à la simulation du comportement des plasmas présents au cœur d'ITER.

La participation de la Suisse à ITER ne se limite toutefois pas aux travaux du SPC. L'Université de Bâle participe également au projet. Par ailleurs, plusieurs entreprises suisses fournissent des composants pour la construction d'ITER, notamment dans les domaines des technologies cryogéniques, de l'alimentation haute tension, du diagnostic des comportements des plasmas, de la métrologie ou des technologies du vide.

Entre 2007 et 2020, la Suisse a participé à la réalisation d'ITER en tant que membre de l'entreprise européenne commune chargée de livrer la contribution européenne à ITER, Fusion for Energy (F4E). Faute d'accord réglant le financement de la participation suisse aux activités de F4E à partir de 2021, celle-ci est actuellement interrompue.

La recherche suisse reste toutefois engagée dans la réalisation d'ITER au travers d'accords de collaboration mis en place au niveau institutionnel par les institutions suisses avec ITER Organization (pour l'Université de Bâle) et F4E (pour le SPC) ainsi que grâce aux contrats commerciaux décrochés par les entreprises suisses.

