



SESAME, un laboratoire G 5 H [F H O O H Q F H P X O D X V H U Y L F H G H V V du Moyen-Orient

Amor Nadji (amor.nadji@synchrotron-soleil.fr) et Abderrahmane Tadjeddine (abderrahmane.tadjeddine@u-psud.fr)

6 RFL « W « FLYLOH 6 \ QFKURWURQ 6 2 / (, / / 5 2 U P H G H V 0 H U
* L I V X U < Y H W W H & H G H [
, Q V W L W X W G H & K L P L H 3 K \ V L T X H 8 0 5 & 1 5 6 8 Q L Y H U V L V

© SESAME

L'objectif du projet SESAME extérieure ne se limite pas à un anneau (Synchrotronlight for Experimental de stockage et à des lignes de lumière. Science and Applications in the Middle doit offrir des conditions d'accueil, East) est de promouvoir la science, de hébergement, de rencontres et d'échanges, favoriser la coopération internationale et se s'intégrer dans une dynamique scienti-paix, et de fournir aux scienti ques de laque, technique et de formation impliquant région des structures ouvertes d'accueille les chercheurs, les ingénieurs, les industriels, de recherche de très haut niveau. les enseignants et les étudiants des pays de

Une telle entreprise implique des volets région. C'est une gageure et un dé à politiques, nanciers, techniques et techrelever, que SESAME pourra assumer avec nologiques, scienti ques et humains le soutien des institutions qui l'accom-allant du choix du site à la formation des sagnent depuis sa création, de la commu-ressources humaines nécessaires, de alité scienti que en général, de sociétés consruction à l'exploitation du laboratoire, savantes telles que la Société Française de ainsi qu'à la création et au développeme Physique, et de nombreuses organisations d'une communauté multidisciplinaire non gouvernementales.

d'utilisateurs dans la région. Elle a vu leAprès avoir dressé un historique du jour grâce au soutien de l'UNESCO et projet, nous présenterons son évolution de l'Agence internationale de l'énergie technique vers un anneau de troisième atomique (AIEA), de l'Union européenne génération de 2,5 GeV (gigaélectronvolt), et de nombreux pays, ainsi que d'un capable de fournir des faisceaux de photons accompagné permanent des autres de haute brillance couvrant un domaine centres de rayonnement synchrotron et spectral allant de l'infrarouge aux rayons X CERN.

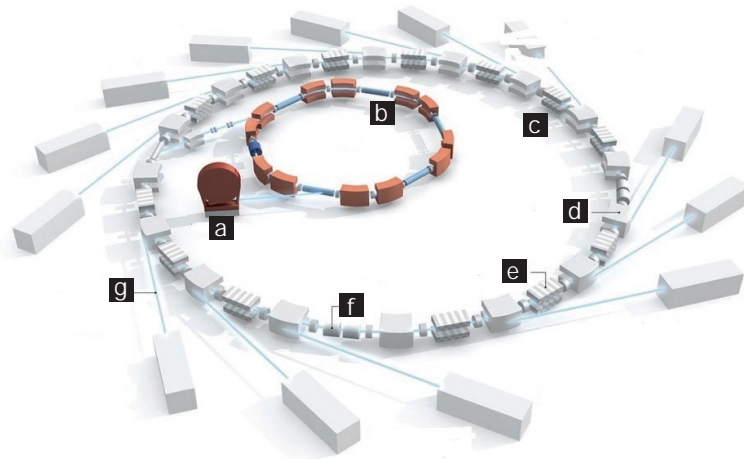
Cependant, un centre de rayonnement électronique, magnétiques et chimiques de synchrotron ouvert à une communauté matière.

Genèse du projet

Le projet a été lancé en juin 1999 par le conseil permanent de l'UNESCO, en présence de délégations de pays du Moyen-Orient et d'autres pays de la région. Neuf d'entre eux ont répondu positivement : Bahreïn (qui s'est peu impliqué et n'est plus membre depuis 2017), Chypre, l'Égypte, l'Iran, Israël, la Jordanie, le Pakistan, la Palestine et la Turquie. La France, l'Union européenne, l'Allemagne, le Brésil, le Canada, la Chine, l'Espagne, la Grèce, l'Italie, le Japon, le Koweït, le Portugal, la Russie, la Suède, la Suisse et les USA sont observateurs. Le projet s'est poursuivi sous la direction de plusieurs commissions annuelles, sans interférence de sources européennes et des USA. Le choix a rapidement évolué vers une source de troisième génération, avec une énergie de 2,5 GeV, impliquant la conception et la construction d'un anneau de stockage spécifique, utilisant BESSY I comme injecteur, et des changements profonds de l'ensemble de l'infrastructure d'Allemagne en Jordanie a été effectué en juin 2002, puis le travail sur le projet a été engagé, sans attendre le choix du site. Une école a été organisée à Amman pour sélectionner puis former des étudiants membres de SESAME. Le premier faisceau d'électrons a été délivré en juillet 2009 dans l'anneau de stockage où les électrons ont été accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière et soumis à une accélération centripète ou à un changement de trajectoire sous l'effet de champs magnétiques. Ses propriétés exceptionnelles – polarisation, gamme spectrale allant du térahertz et de l'infrarouge aux rayons X durs de plusieurs dizaines de keV, brillance (nombre de photons/seconde/unité d'angle solide) dix fois plus intense que le faisceau délivré par le synchrotron français Lure (Laboratoire de physique des particules de Saclay), ont fait de SESAME un outil multidisciplinaire incontournable de caractérisation de la structure de la matière dans tous ses états et à toutes les échelles, justifiant la construction de sources dédiées [1].

Source de rayonnement synchrotron

Le rayonnement synchrotron est constitué d'ondes électromagnétiques émises par les électrons circulant dans des anneaux de stockage à des vitesses proches de celle de la lumière et soumis à une accélération centripète ou à un changement de trajectoire sous l'effet de champs magnétiques. Ses propriétés exceptionnelles – polarisation, gamme spectrale allant du térahertz et de l'infrarouge aux rayons X durs de plusieurs dizaines de keV, brillance (nombre de photons/seconde/unité d'angle solide) dix fois plus intense que le faisceau délivré par le synchrotron français Lure (Laboratoire de physique des particules de Saclay), ont fait de SESAME un outil multidisciplinaire incontournable de caractérisation de la structure de la matière dans tous ses états et à toutes les échelles, justifiant la construction de sources dédiées [1].



- a : cathode fournissant des électrons accélérés par un accélérateur circulaire (microtron)
- b : anneau injecteur (*booster*)
- c : anneau de stockage
- d : aimants de courbure
- e : éléments magnétiques d'insertion
- f : cavité radiofréquence
- g : lignes de lumière [2]

(Amman, octobre 2002) qui a exprimé la nécessité d'accroître l'énergie des photons jusqu'au seuil K du sélénium, utilisé en cristallographie des protéines. Le nouvel anneau de stockage est constitué de 16 cellules identiques. Les éléments de base de chaque cellule sont des dipôles combinés, entourés par un ensemble de quadropôles et de sextupôles (g. 2). La focalisation verticale est assurée par le dipôle combiné et la focalisation horizontale par les quadropôles. La circonférence de l'anneau est portée à 130 mètres, l'émission (produit de la taille du faisceau d'électrons par sa divergence) étant de 25 nm.rad à 2,5 GeV. Les spécifications de la machine sont résumées dans le *Conceptual Design Report* consigné dans le *SESAME Yellow Book* [5].

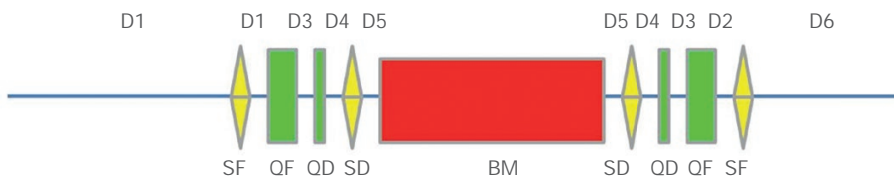
Évolution de la machine une machine de troisième génération

sont éventuellement accélérés à leur énergie nominale (2,5 GeV pour SESAME) et plusieurs ateliers organisés au Moyen-Orient ont montré que le programme de dispositifs magnétiques, dipôles (ou aimants de courbure), onduleurs ou *wigglers* (succession périodique d'aimants de polarités alternées), dévient leur trajectoire ou les fait osciller. Les électrons ainsi freinés perdent de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique appelé « rayonnement synchrotron ». Ces pertes d'énergie sont exactement compensées à chaque tour par des cavités radiofréquence (RF). Le rayonnement synchrotron produit dans les aimants de courbure et les éléments d'insertion (*wigglers* ou onduleurs) est sélectionné, conditionné et dirigé par des systèmes optiques des lignes de lumière vers les stations expérimentales [2]. La conception de la source de rayonnement synchrotron est optimisée en fonction de ses applications [3].

Plusieurs ateliers organisés au Moyen-Orient ont montré que le programme de dispositifs magnétiques, dipôles (ou aimants de courbure), onduleurs ou *wigglers* (succession périodique d'aimants de polarités alternées), dévient leur trajectoire ou les fait osciller. Les électrons ainsi freinés perdent de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique appelé « rayonnement synchrotron ». Ces pertes d'énergie sont exactement compensées à chaque tour par des cavités radiofréquence (RF). Le rayonnement synchrotron produit dans les aimants de courbure et les éléments d'insertion (*wigglers* ou onduleurs) est sélectionné, conditionné et dirigé par des systèmes optiques des lignes de lumière vers les stations expérimentales [2]. La conception de la source de rayonnement synchrotron est optimisée en fonction de ses applications [3].

La construction du bâtiment a débuté en 2003 et l'emménagement à l'intérieur des nouveaux locaux en 2008. Les dimensions du hall expérimental (60 x 60 m) ont été conçues pour héberger l'anneau de 130 m de circonférence et disposer de lignes de lumière de 30 m de longueur. Les trois accélérateurs (*microtron*, *booster* et anneau de stockage) sont logés dans des tunnels en béton dont les caractéristiques ont été déterminées par un calcul de radioprotection validé par des experts internationaux. Le bâtiment principal, conçu pour absorber les vibrations verticales, comprend les structures laboratoires et les bureaux. La stabilité est encore améliorée par le découplage des fondations du hall expérimental du bâtiment technique, séparé du bâtiment principal avec lequel il n'est relié que par un pont couvert assurant le passage des câbles et des canalisations de fluides, abrite tous les équipements de refroidissement et une partie des transformateurs. Ainsi, les vibrations générées par le fonctionnement des composants électromécaniques ne sont pas transférées au bâtiment principal.

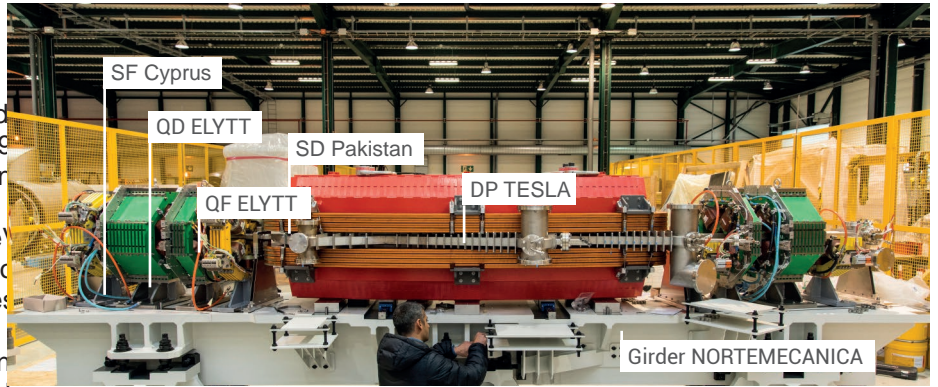
Une station électrique avec quatre transformateurs, connectée à la Compagnie électrique jordanienne par un câble dédié de 7,2 km de long, assure une puissance de 6 MVA. Elle est complétée depuis début 2019 par une centrale solaire qui fournira l'essentiel de l'énergie électrique, faisant de SESAME la première source synchrotron alimentée en énergie renouvelable.



2. Une des seize cellules de la maille de l'anneau de stockage de SESAME. BM : dipôle combiné. D1... D6 : distances. QF et QD : quadropôles respectivement focalisant et défocalisant. SF et SD : sextupôles respectivement focalisant et défocalisant.

Mise en opération du microtron et du booster

Le premier faisceau d'électrons de microtron a été obtenu le 14 juillet 2009 à une énergie de 9,1 MeV, permettant d'effectuer les tests préliminaires. Il a été extrait à l'énergie maximale de 22,5 MeV en novembre 2011, après la construction du mur de blindage définitif. Les autres paramètres du faisceau sont proches des valeurs prévues. Plusieurs tests ont montré la bonne reproductibilité du faisceau et la fiabilité des équipements. C'est une belle réussite, récompensant le grand effort du personnel de SESAME.



3. Une des seize cellules de l'anneau de stockage de SESAME, assemblée au CERN avant son expédition à Amman. Les noms des entreprises ou des pays ayant contribué à la construction des différents éléments sont indiqués.

Le booster de SESAME a été construit à partir d'éléments de BESSY I. Avant la mise en opération avec faisceau, plusieurs tests ont été effectués et plusieurs améliorations réalisées. Tous les aimants (12 dipôles, 12 quadrupôles focalisants et 6 quadrupôles défocalisants) ont été testés électriquement et hydrauliquement. Le système d'alignement a été amélioré pour les quadrupôles et construit pour les quadrupôles. Les alimentations électriques ont été remplacées. Les aimants pulvérisés à haute fréquence (RF) et leurs alimentations ont été testés. Le système de vide et une partie du système de contrôle ont été renouvelés. De nouveaux diagnostics, par exemple sept nouveaux modules de lecture locale de la position du faisceau ont été introduits.

Le 3 septembre 2014, l'équipe de SESAME a réussi à accélérer à 800 MeV les électrons dans le booster et à valider son fonctionnement aux valeurs nominales. L'émission mesurée, 120 nm.rad, est proche de la valeur théorique, avec un courant maximum accéléré de l'ordre de 5 mA, voisin de sa valeur dans BESSY I.

À la sortie du booster, les électrons passent à travers une ligne de transfert vers l'anneau de stockage qui, à chaque remplissage, maintient un faisceau d'électrons de 200 mA (400 mA à terme) à 2,5 GeV, circulant pendant plusieurs heures.

Construction, montage et mise en opération de l'anneau de stockage

L'anneau de stockage est complètement nouveau. Sa conception et l'évaluation de ses coûts ont été réalisées en 2009 sous

la direction d'Amor Nadji et validées par le comité consultatif technique international de SESAME (TAC), regroupant des experts des laboratoires mondiaux de rayonnement synchrotron.

Les éléments magnétiques ont été construits dans le cadre du contrat européen (FP7) CESSAMag [7]. L'Union européenne a financé le coût des aimants et des poutres-supports (girders), et le CERN a mis à disposition ses experts pour le suivi de la construction à laquelle des entreprises de pays membres de SESAME (Chypre, Pakistan et Turquie) ont contribué, comme précisé sur la figure 3. Ces entreprises, qui n'avaient aucune expérience dans la production de composants d'accélérateur, avaient le potentiel de le faire, d'après une évaluation de l'expertise du CERN. En passant la commande d'un prototype, le CERN a pu valider ses résultats prometteurs. En novembre 2018, les composants et s'assurer que les aimants étaient fabriqués selon les spécifications de SESAME. De fait, la société turque Elytt a construit les bobines des quadrupôles, et les sextupôles (66 aimants) ont été assemblés moitié par une société chypriote et moitié par une société pakistanaise, leurs alimentations ayant été acquises auprès d'une compagnie israélienne.

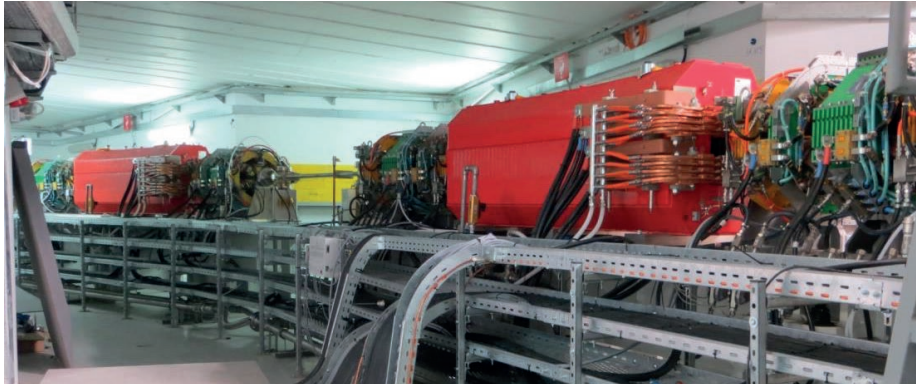
Le système radiofréquence (RF) de l'anneau de stockage de SESAME est composé de quatre cavités accélératrices à 500 MHz de type ELETTRA (centre synchrotron italien), alimentées par quatre amplificateurs à semi-conducteurs de 80 kW chacun. La ligne XAFS/XRF (structure d'absorption des rayons X et fluorescence X, 5 à 30 keV), donation de l'institut français SIGMAPHI ELECTRONICS, HZDR (Dresde, Allemagne), installée sur un aimant de courbure, est en exploitation sous la responsabilité de Messaoud

L'installation de l'anneau de stockage a été achevée en novembre 2016 sous la direction d'Erhard Huttel. La figure 4 montre une partie de l'anneau où l'on peut apercevoir les aimants, une partie de chambre à vide et les chemins de câbles.

Le premier faisceau d'électrons a circulé le 12 janvier 2017. Les physiciens des accélérateurs de SESAME ont ensuite successivement réussi à lui faire faire plusieurs tours, puis à stocker et en accumuler un faisceau dans l'anneau de stockage après des réglages délicats d'orbite verticale. L'énergie nominale de 2,5 GeV a été atteinte en avril 2017. Le temps nécessaire pour passer de l'énergie d'injection de 800 MeV à l'énergie de travail de l'anneau de stockage de 2,5 GeV est de l'ordre de 190 secondes. L'optimisation du fonctionnement de l'anneau se poursuit avec des résultats prometteurs. En novembre 2018, l'anneau avait atteint un courant dans l'anneau de 200 mA avec une durée de vie de l'ordre de 15 heures.

Les lignes de lumière GH OD SKDVH b

La sélection des lignes de lumière de la phase 1 a été basée sur les contributions d'au moins cinq ateliers et des réunions d'utilisateurs, auxquelles ont participé plusieurs centaines de scientifiques du Moyen-Orient. Parmi les sept lignes retenues, trois sont opérationnelles, une est en construction et deux en conception. La ligne XAFS/XRF (structure ne d'absorption des rayons X et fluorescence X, 5 à 30 keV), donation de l'institut français SIGMAPHI ELECTRONICS, HZDR (Dresde, Allemagne), installée sur un aimant de courbure, est en exploitation sous la responsabilité de Messaoud



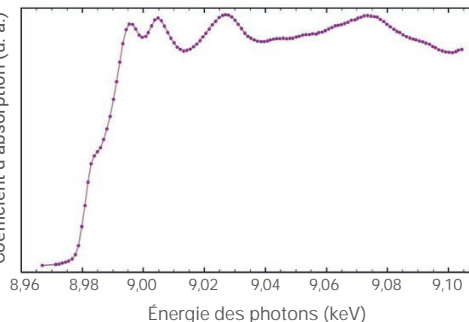
4. Vue d'une partie de l'anneau de stockage dans son tunnel.

Une centaine de candidats de la région ont participé à une école de deux semaines dédiée aux accélérateurs de particules et aux technologies associées. À l'issue de cette école, 20 à 25 participants ont été sélectionnés pour une formation spécifique de longue durée (~ 18 mois) proposée individuellement dans l'un des laboratoires européens du domaine. Ils ont pu y approfondir leurs connaissances en participant à des écoles très réputées comme le CAS (Cern Accelerator School). À la suite de cette formation longue, plusieurs participants ont rejoint le projet SESAME et contribué de façon significative à sa construction.

Harfouche. Elle a fourni son premier spectre au seuil d'absorption K du cuivre le 22 novembre 2017 (g. 5). Elle a accueilli en juillet 2018 ses premiers utilisateurs : une équipe de paléontologues du Cyprus Institute, animée par la professeure Kirsi Lorentz, dont le projet était l'un des dix-neuf retenus sur les cinquante-neuf déposés lors du premier appel d'offres. L'équipe a détecté et dosé des éléments métalliques sur des restes d'ossements humains de la région, datant du Néolithique. La ligne XAFS/XRF a publié son premier article sur la caractérisation de catalyseurs de reformage de CO₂.

La seconde ligne de lumière (IR) est une ligne de spectromicroscopie infrarouge (0,1 à 3 eV), utilisant un des aimants de courbure de la machine, conçue et construite en étroite collaboration avec SOLEIL sous la responsabilité de Gihan Kamal (SESAME) et Paul Dumas (SOLEIL). Elle est opérationnelle depuis septembre 2018 (g. 6) et a accueilli plusieurs équipes extérieures, dont celle du professeur Gehan Ahmad du National Research Center d'Egypte, qui a présenté au dernier Conseil SESAME des résultats remarquables sur la maladie d'Alzheimer. Le premier article issu de cette ligne [9] porte sur les résultats obtenus par une équipe jordanienne regroupant des chercheurs en pharmacologie et en médecine sur la biochimie du placenta et du plasma de pré-éclampsie, syndrome affectant des femmes enceintes.

La troisième ligne de lumière (MS), installée sur un *wiggler*, est en test sous faisceau. Transférée du centre synchrotrons suisse SLS et équipée d'un nouveau détecteur très performant, elle est dédiée à la diffraction des rayons X (entre 5 et 25 keV)



H d Q D Q F H P H Q W G X

En 2017, le coût total du projet avait atteint 90 millions de dollars. Le budget de SESAME a été réparti entre les États membres et le soutien international : Site, bâtiments et infrastructures (routes, électricité et eau) payés par la Jordanie (12,77 M\$) ; centrale électrique solaire financée avec l'aide de l'Union européenne à la Jordanie (7 M\$).

Budget annuel d'exploitation (salaires, électricité, eau, différents consommables...) financé par les actuels États membres. Ce budget, décidé annuellement par le Conseil, est élevé à 5,288 M\$ en 2018 et est appelé à croître avec l'augmentation du nombre de lignes expérimentales et d'utilisateurs. L'enjeu est de consolider ce financement, notamment par l'intégration de nouveaux États membres.

Le système d'injection offert par l'Allemagne est mis à niveau par SESAME (10 M\$), financé par l'Union européenne (11,3 M\$) et par l'Union européenne (11,3 M\$) et par trois pays membres de SESAME (Israël, Jordanie et Turquie).

6 SHFWUH ; \$1 (6 DX VHXL O .
obtenu le 4 décembre 2017 sur la ligne de lumière XAFS/XRF.
(Courtoisie du Dr. M. Harfouche, SESAME).

- Lignes de lumière, dont certaines sont dotées de donations d'autres laboratoires (23,3 M\$).
- Formation de scientifiques, ingénieurs et techniciens sur des budgets financés par l'AIEA, des sociétés savantes, des sociétés caritatives, et l'Union européenne via le programme OPEN SESAME (voir ci-après).

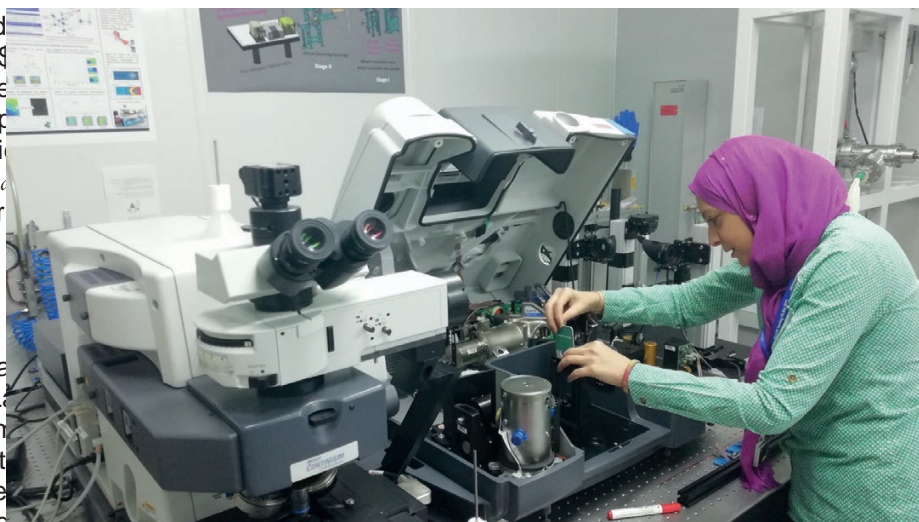
Conclusion et perspectives

SESAME vient de basculer de sa phase de construction à celle d'exploitation. La machine délivre déjà un faisceau de 200 mA à 2,5 GeV, d'une durée de vie suffisante pour réaliser des expériences de niveau international. Le personnel technique, scientifique et administratif de SESAME est composé aujourd'hui de 48 personnes.

Onze recrutements sont programmés en 2020 grâce à la réduction de 90% du budget annuel d'électricité générée par la centrale solaire. Suite au premier appel à projets, 103 projets ont été déposés par des équipes d'une dizaine de pays.

Les premiers utilisateurs, dont les projets ont été sélectionnés par un comité d'experts indépendants, ont été accueillis dans l'été 2018. Entre juillet et décembre 2018, 23 expériences ont ainsi été réalisées sur les deux lignes de lumière XAFS/XRS (LEAPS) basées sur des accélérateurs IR, par des équipes provenant de différents pays (Chypre, Turquie, Égypte, Iran, Pakistan, Jordanie) et de différentes disciplines (archéologie, sciences de la chimie des batteries et de l'environnement, sciences des matériaux). 45 expériences ont été réalisées en 2019. Quarante articles ont été publiés ou sont en cours de publication dans des revues internationales. C'est un succès remarquable, qui montre que SESAME est déjà une institution structurante pour la recherche et

l'innovation dans la région, comme en témoignent les 151 demandes de faisceaux déposées à la suite du second appel à projets de janvier 2020. Cette dynamique va encore s'accélérer avec la mise en service en 2020 de la troisième ligne expérimentale de diffraction X (MS) dédiée aux sciences des matériaux. La maison d'hôtes financée par l'Italie et inaugurée en décembre 2019, accueille les utilisateurs dans ses 45 chambres en partie meublées par la Suisse ; elle dispose d'un service de restauration et de salles de travail et de conférences très fonctionnelles, permettant ainsi à SESAME d'œuvrer en continu y compris les week-ends.



OLVH HQ SODFH G5XQH H[S «ULHQFH VXU OD OLJQH GH OXP Synchrotron SESAME.

SESAME est déjà impliqué dans plusieurs collaborations avec les autres centres de rayonnement synchrotron et dans des programmes européens tel que OPEN SESAME, destiné à insérer ses utilisateurs dans les principaux axes de recherche utilisant le rayonnement synchrotron. SESAME est aussi associé depuis novembre 2018 à la ligne européenne des sources de photons (LEAP) basée sur des accélérateurs IR, par des équipes provenant de différents pays (Chypre, Turquie, Égypte, Iran, Pakistan, Jordanie) et de différentes disciplines (archéologie, sciences de la chimie des batteries et de l'environnement, sciences des matériaux). 45 expériences ont été réalisées en 2019. Quarante articles ont été publiés ou sont en cours de publication dans des revues internationales. C'est un succès remarquable, qui montre que SESAME est déjà une institution structurante pour la recherche et

l'innovation dans la région, comme en témoignent les 151 demandes de faisceaux déposées à la suite du second appel à projets de janvier 2020. Cette dynamique va encore s'accélérer avec la mise en service en 2020 de la troisième ligne expérimentale de diffraction X (MS) dédiée aux sciences des matériaux. La maison d'hôtes financée par l'Italie et inaugurée en décembre 2019, accueille les utilisateurs dans ses 45 chambres en partie meublées par la Suisse ; elle dispose d'un service de restauration et de salles de travail et de conférences très fonctionnelles, permettant ainsi à SESAME d'œuvrer en continu y compris les week-ends.

Références

1. « La lumière synchrotron au service de la science et de la société », *Reflets de la physique*, numéro spécial (2013). www.synchrotron-soleil.fr
2. A. Michalowicz et al., « De Frascati à Soleil, histoire du rayonnement synchrotron (1963-2013) », *Histoire de la recherche contemporaine*, tome III-1 (2014), <http://journals.openedition.org/hrc/413> ; DOI : 10.4000/hrc.413
3. *Sesame White Book* (juillet 2002), <https://www.sesame.org.jo>
4. *Sesame Yellow Book* (mai 2003), <https://www.sesame.org.jo>
5. S. Varnasseri et al., "Finalized design of the pulsed magnets and their PS for SESAME ring injection", *Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy* (23-27 juin 2008). <https://cessamag.web.cern.ch/>
6. S. Bac et al., "Exceptionally active and stable catalysts for CO₂ reforming of glycerol to syngas", *Applied Catalysis B: Environmental*, (2019) 117808.
7. L.A. Dahabiyeh et al., "Investigating the molecular structure of placenta and plasma in pre-eclampsia by infrared microscopy", *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 184 (2020) 113186.

(a) Nous souhaitons rendre hommage à Michel Sommer, ingénieur et alors directeur des anneaux du Lure, pour son engagement enthousiaste dans le projet et le rôle qu'il a joué dans la formation et la sélection des premiers ingénieurs machine de SESAME.

(b) En effet, la substitution des atomes de soufre des méthionines et des cystéines par des atomes de sélénium permet d'obtenir des informations sur la phase du signal diffracté et de résoudre la structure de la protéine.