



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF

**Staatssekretariat für Bildung,
Forschung und Innovation SBFI**
Forschung und Innovation

6. Mai 2020

Öffentlich finanzierte Energieforschung in der Schweiz

Überblick über Entwicklungen und aktuelle Herausforderungen

Aktenzeichen: SBFI-591-1169/2



Einleitung

Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 haben Bundesrat und Parlament den schrittweisen Ausstieg der Schweiz aus der Kernenergie beschlossen. Um den Klimawandel zu bremsen, muss zudem der Ausstoss von Treibhausgasen deutlich reduziert werden. Diese Entwicklungen bedingen einen tiefgreifenden Umbau des Schweizer Energiesystems. Die Energieforschung ist dabei ein wichtiger Pfeiler für die nachhaltige Sicherung der Energieversorgung.

Die Herausforderungen für die Energieforschung liegen im Spannungsfeld zwischen langfristigen Perspektiven und Visionen und kurzfristigen, wirtschaftlichen und politischen Realitäten. Die Entwicklung von Energietechnologien und -systemen benötigt viel Zeit von der Grundlagenforschung bis zu deren Einführung. Die Verbindung langjähriger Forschungsprogramme mit der Förderung über Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte soll den Transfer hin zu marktreifen Technologien ermöglichen und beschleunigen.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über Entwicklungen und Prioritäten der öffentlichen Energieforschung in der Schweiz. Dabei stehen die strukturellen Verschiebungen nach dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie und dem Umbau des Schweizer Energiesystems im Rahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes im Mittelpunkt.

Der Bericht zeigt zunächst in Abschnitt 1 die Entwicklung der öffentlich finanzierten Energieforschung, primär auf Basis der Energieforschungsstatistik des Bundesamtes für Energie (BFE), aber auch im Hinblick auf Massnahmen im Rahmen des Aktionsplans «Koordinierte Energieforschung Schweiz». Im zweiten und dritten Abschnitt werden zwei besondere Herausforderungen der Energieforschung in den kommenden Dekaden dargestellt: einerseits die Gewährleistung der nuklearen Sicherheit unter Berücksichtigung des Ausstiegs aus der Kernenergie, andererseits den Erhalt und die Stärkung der Forschungskompetenzen, damit die Schweiz weiterhin das Potenzial auch neuer nuklearer Technologien für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiestrategie 2050 und der Erreichung der Schweizer Klimaziele beurteilen kann.

Der vorliegende Bericht stützt sich auf verschiedene Grundlagenarbeiten und Beiträge von externen Experten, welche in folgenden Anhängen dargestellt sind:

- Anhang 1: Auswertung Statistik öffentlich finanzierte Energieforschung in der Schweiz
- Anhang 2: Förderprogramm Energie Innosuisse
- Anhang 3: Preserving Competence in Nuclear Technology and Managing its Legacies
- Anhang 4: Participation suisse aux recherches internationales dans le domaine nucléaire
- Anhang 5: Les réacteurs au thorium sont le futur de l'énergie durable

1. Öffentlich finanzierte Energieforschung: von der Nukleartechnik zu erneuerbaren Energien

In den vergangenen zehn Jahren (letzte Daten sind derzeit für das Jahr 2018 verfügbar) sind die öffentlichen Aufwendungen für die Energieforschung in der Schweiz insgesamt stark angestiegen: Der Anteil der Ausgaben am BIP ist von rund 0.3‰ im Jahr 2008 auf zuletzt rund 0.6‰ gestiegen (siehe Anhang 1, Abbildung 1). Dies vor dem Hintergrund, dass die Grundlagenforschung, aber auch die anwendungsorientierten Forschungs- und Innovationsprogramme ein wesentliches Element für die Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 darstellen. Zum Anstieg beigetragen haben namentlich:

- Der Aufbau von nationalen Kompetenzzentren in der Energieforschung durch die KTI/Innosuisse (Swiss Competence Center for Energy Research, SCCER) seit 2013;

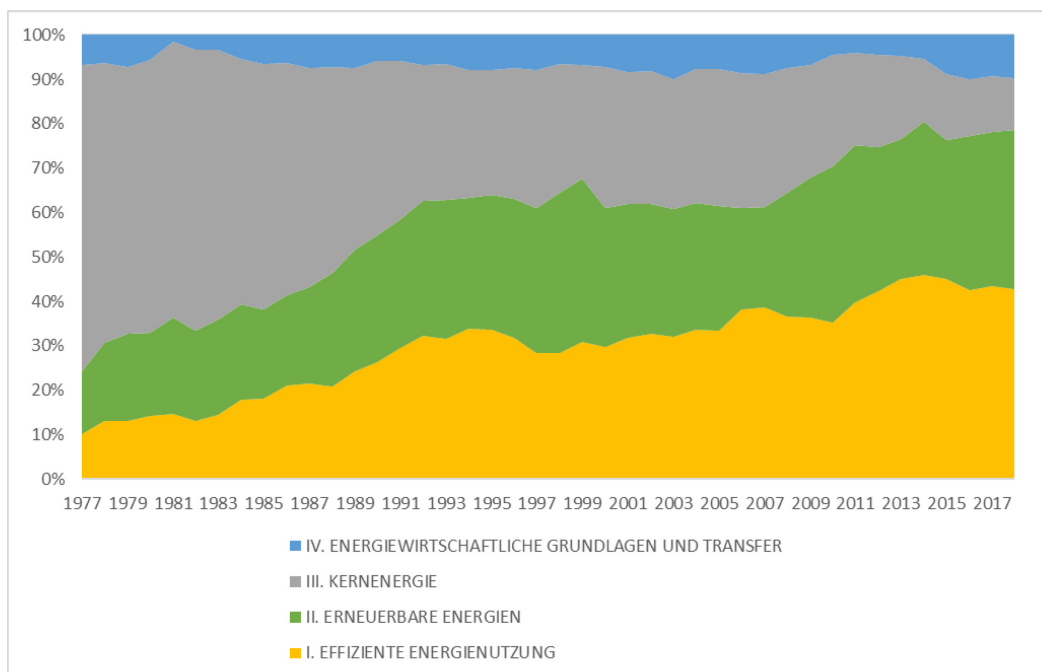
- neue Nationale Forschungsprogramme des SNF im Energiebereich;
- ein Ausbau der Pilot- und Demonstrationsaktivitäten des BFE.

Dank dieser Zunahmen weist die Schweiz mit Aufwendungen von rund 0,6 ‰ des BIP (404 Mio. CHF) auch im internationalen Vergleich überdurchschnittlich hohe Forschungsausgaben auf (siehe Anhang 1, Abbildung 2).

Der Anstieg der Forschungsausgaben wurde begleitet von **strukturellen Änderungen der Ausrichtung der Forschung**. So zeigt sich seit etwa 2005 trendmässig eine starke Zunahme der Aufwendungen in den Forschungsbereichen «Effiziente Energienutzung» und «Erneuerbare Energien». Seit dem Jahr 2014 wurde zudem die nicht-technische Energieforschung (Energiewirtschaftliche Grundlagen und Transfer), insbesondere an den kantonalen Universitäten stark ausgeweitet (siehe Anhang 1, Abbildung 3).

Die prozentualen Anteile der vier in der Energieforschungsstatistik erfassten Themengebiete haben sich vor diesem Hintergrund in der längerfristigen Betrachtung stark verändert (siehe Abbildung 1; weitere Erläuterungen in Anhang 1, Kapitel 2):

Abbildung 1: Aufteilung der Aufwendungen gemäss den vier Forschungsschwerpunkten



Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

Beispielsweise hat der Anteil für Forschung und Entwicklung im Bereich der Kernenergie (Fusion und Fission) an der gesamten öffentlichen Förderung von zu Beginn über 60% auf jüngst noch 12% abgenommen, jener für erneuerbare Energien hat von 14% auf 36% zugenommen. Die stärkste Steigerung verzeichnete der Anteil für die Effiziente Energienutzung mit einer Zunahme von 10% auf 43%.

Zudem hat sich im zeitlichen Verlauf die **Energieforschungslandschaft in der Schweiz deutlich diversifiziert**. Wurden 2010 noch 76% der Ausgaben im ETH-Bereich getätigt, hat sich dieser Anteil bis 2018 auf 59% reduziert (siehe Anhang 1, Abbildung 9). Gleichzeitig bestehen in der funktionalen Aufteilung entlang der vier Forschungsbereiche deutliche Unterschiede zwischen den forschenden Institutionen (siehe Anhang 1, Abbildung 10). So wird die Kernenergieforschung nahezu ausschliesslich an der EPFL und dem PSI durchgeführt. Demgegenüber wird der grösste Aufwand für Forschung im Bereich der effizienten Energienutzung an den Fachhochschulen getätigt (wobei im Vergleich im ETH-Bereich die Teilschulen / Forschungsanstalten einzeln betrachtet werden). Die Universitäten setzen schliesslich den Hauptschwerpunkt auf die nicht-technische Energieforschung.

1.1 Aufbau von Forschungskompetenzzentren (SCCER)

Ein wichtiges Element für den Kompetenzaufbau in der Energieforschung stellte der Aktionsplan «Koor-dinierte Energieforschung Schweiz» aus dem Jahr 2012 dar. Die darin definierten Massnahmen berücksichtigten die Grundlagenforschung, legten das Hauptgewicht aber auf die anwendungsorientierte For-schung und das Nutzen ihrer Resultate für die Innovationsförderung.

2013 bewilligte das Parlament CHF 202 Millionen, um den Aktionsplan umzusetzen. Darin vorgesehen war im Rahmen des kompetitiven Förderprogramms Energie – nebst einer Verstärkung von Innovationsprojekten im Energiebereich (CHF 46 Mio.) – der Aufbau und Betrieb von interuniversitär vernetzten Forschungskompetenzzentren, den Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER), (CHF 72 Mio.) - in Zuständigkeit der damaligen Kommission für Technologie und Innovation (KTI) in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Nationalfonds (SNF).

Während der ersten Förderperiode (2013-2016) haben die SCCER **erfolgreich Forschungskapazitäten aufgebaut** und damit eines ihrer wichtigsten Ziele erreicht bzw. sogar übertroffen. 2016 beschlossen Bundesrat und Parlament das Förderprogramm Energie in den Jahren 2017-2020 mit weiteren CHF 139.2 Mio. zu unterstützen. In der zweiten Förderperiode (2017-2020) werden die Forschungskapazitäten entsprechend konsolidiert und in spezifischen Fokusbereichen weiter aufgebaut.

Auch wenn die SCCER noch bis Ende 2020 weiterlaufen, hat der Auf- und Ausbau von Forschungskapa-zitäten im diesem Rahmen die Energieforschung in der Schweiz bereits nachhaltig gestärkt und hat eine Vielzahl an neuen Forschungsprojekten ermöglicht. Der gestiegene wissenschaftliche Output beinhaltet ein grosses Potential für die erfolgreiche Umsetzung der Energiestrategie 2050 (siehe Anhang 2).

Die Finanzierung der SCCER ist als Anschubfinanzierung ausgestaltet. Die Hochschulen verpflichteten sich dabei, die aufgebauten Kapazitäten weiterzuführen. Damit wird nicht nur der Kapazitätsaufbau nachhaltig wirken, sondern die errichteten Infrastrukturen werden über das Ende des Förderprogramms Energie hinaus bestehen bleiben.

Den Konsortien stehen für die zukünftige Finanzierung ihrer Vorhaben weiterhin die bestehenden För-derinstrumente der Innosuisse, wie z.B. die Förderung der Innovationsprojekte und NTN Innovation Booster, oder des BFE (Ressortforschung, Pilot- und Demonstrationsprogramm) zur Verfügung. Darüber hinaus sind sie gut für die erfolgreiche Teilnahme an kompetitiv vergebenen, internationalen F&I-Mitteln (namentlich aus dem EU-Forschungsrahmenprogramm; vgl. Abschnitt 1.4) aufgestellt.

1.2 Weiternutzung der Kompetenzen im Rahmen des neuen Forschungsprogramms SWEET

Der Kapazitäts- und Kompetenzaufbau durch die SCCER wird Ende 2020 abgeschlossen sein. Um die an den Hochschulen aufgebauten Kompetenzen und Kapazitäten für die zentralen Forschungsthemen der Energie- und Klimastrategie der Schweiz auch weiterhin gezielt nutzen zu können, hat der Bundesrat am 26. Februar 2020 ein neues Energieforschungsförderprogramm SWEET (Swiss Energy Research for the Energy Transition) zuhanden des Parlaments verabschiedet. In SWEET werden in erster Linie Konsortien aus Hochschulen Forschungsprojekte auf unterschiedlichen Technologiereifestufen (TRS) einreichen können. Die Ausschreibungen und die Gesamtsteuerung erfolgen durch das BFE. Das Programm soll über 12 Jahre, von 2021 bis 2032, laufen. Gefördert werden damit ausschliesslich wettbewerblich ausge-schriebene Konsortialprojekte, die zentrale Forschungsthemen der Energiestrategie 2050 bearbeiten. Einzelprojekte können weiterhin über die bisherigen Förderinstrumente des BFE (Ressortforschung und Pilot- und Demonstrationsprogramm) gefördert werden.

Mit der Vorlage will der Bundesrat eine nahtlose Nachfolge für die Swiss Competence Centers in Energy Research (SCCER) schaffen. In den zwölf Jahren zwischen 2021 bis 2032 wird SWEET rollend Ausschreibungen für Konsortialprojekte mit einer Laufzeit von durchschnittlich sieben Jahren durchführen. Der Bundesrat beantragt dafür einen Verpflichtungskredit von 136,4 Millionen. Dazu kommen 11,9 Millionen Aufwand für Personal und Vollzug. Insgesamt betragen die Kosten damit 148,3 Millionen Franken. Die entsprechenden Aufwendungen sind in den beantragten Mitteln der BFI-Botschaften (Perioden 2021-2024 sowie Folgeperioden) kompensiert.

1.3 Contribution des infrastructures de recherche internationales à la recherche énergétique

La participation de la Suisse aux grandes infrastructures de recherche internationales permet aux chercheurs suisses d'appuyer leurs travaux sur l'utilisation d'instruments de premier plan mondial et de participer à des expériences dont l'envergure dépasse le cadre national. Ces entités apportent donc une contribution transversale mais néanmoins significative à la recherche en énergie. C'est notamment le cas des infrastructures dédiées à la physique des matériaux et à la physique nucléaire.

Quand bien même il n'est pas possible de quantifier précisément la contribution apportée par ces infrastructures internationales à la recherche suisse dans le domaine de l'énergie, il convient de garder à l'esprit les contributions d'Etat membre que la Suisse leur verse chaque année, dans la mesure où celles-ci financent pour partie des recherches dans le domaine énergétique, que ces dernières soient menées par des équipes suisses, étrangères ou internationales. L'apport des infrastructures de recherche internationales concernées à la recherche en énergie est illustré ci-dessous.

ITER (Cadarache) : Evoquée plus en détail ci-dessous (voir section Recherches en fusion nucléaire), l'infrastructure expérimentale internationale ITER vise à démontrer la rentabilité énergétique de la fusion nucléaire en tant que source d'énergie propre, durable, et sûre en vue de la production commerciale à grande échelle de courant électrique. ITER devrait produire des résultats décisifs d'ici 2035.

La participation suisse à ITER est en pleine cohérence avec la conduite du programme de recherche en fusion nucléaire en Suisse identifié comme une « tâche nationale » par le Conseil des EPF, et qui comprend notamment l'exploitation de l'installation du Tokamak à Configuration Variable (TCV) au Swiss Plasma Center de l'EPFL.

Sources de lumières : L'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, Grenoble) est depuis 1994 un leader mondial dans le domaine des sources de rayonnement synchrotron de 3^{ème} génération, qui ont ouvert un accès sans précédent à l'analyse de la matière à l'échelle atomique. D'importantes recherches y sont menées en relation avec le domaine énergétique, notamment en 2018 dans les domaines des batteries, des cellules solaires et des LED, des piles à combustible ou encore de la supraconductivité au haute température. A l'arrêt depuis fin 2018 afin de renouveler ses installations, ESRF mettra à disposition de ses utilisateurs dès le second semestre 2020 la plus puissante source de rayonnement synchrotron de 4^{ème} génération au monde.

Mis en service en 2017, le European X-Ray Free-Electron Laser (European XFEL, Hambourg) permet aux scientifiques d'étudier différents processus moléculaires et atomiques grâce à des impulsions de rayons X d'une intensité inégalée. Leurs applications dans le domaine énergétique sont nombreuses, allant de la compréhension de la photosynthèse à celle des plasmas utilisés dans le domaine de la fusion nucléaire.

Les participations suisses à ESRF et à European XFEL sont en pleine cohérence avec l'exploitation des installations Swiss Light Source et SwissFEL à l'Institut Paul Scherrer.

Sources de neutrons : L'Institut Laue-Langevin (ILL, Grenoble) est depuis 1972 la source de neutrons dédiée à la recherche la plus puissante au monde. Des recherches conduites en 2018 à l'ILL ont par exemple permis de mettre en évidence l'intérêt des liquides ioniques pour les batteries, les cellules

solaires et les super-condensateurs. D'importants travaux de recherche y sont également menés dans l'étude des semi-conducteurs organiques afin d'ouvrir la voie à l'utilisation de la photosynthèse pour la production et le stockage d'énergie solaire sous forme d'hydrogène.

Actuellement en construction, la European Spallation Source (ESS, Lund) ouvrira dès 2023 de nouvelles perspectives pour l'étude des propriétés des matériaux impliqués dans la production, le stockage et l'utilisation d'énergie.

Les participations suisses à ILL et ESS sont en pleine cohérence avec l'exploitation de l'installation SINQ à l'Institut Paul Scherrer.

CERN (Genève) : Différentes technologies développées dans le cadre des recherches menées au CERN donnent lieu chaque année à des applications indirectes dans le domaine énergétique. La recherche en énergie n'appartient toutefois pas aux activités centrales du CERN, si bien que les contributions versées par la Suisse au bénéfice de cette organisation ne sont ici pas prises en compte.

Tabelle 1 : Contributions de la Suisse aux infrastructures de recherche internationales actives dans le domaine de l'énergie (Mio. CHF, 2016-2019)

Bereich	2016 (effektiv)	2017 (effektiv)	2018 (effektiv)	2019 (effektiv)	Total
ESRF	3.8	4.1	4.1	4.4	16.4
European Spallation Source	2.4	13.5	11.8	10.7	38.4
ILL	3.6	3.5	3.2	3.1	13.4
ITER	14.3	12.6	15.9	14.7	57.5
European XFEL	2.3	1.6	1.9	2.0	7.8
Total	26.4	35.3	36.9	35.4	134

1.4 Beitrag des EU-Rahmenprogramms für Forschung und Innovation (Horizon 2020) zur Energieforschung

Das Rahmenprogramm der EU für Forschung und Innovation (aktuell in seiner 8. Generation mit dem Namen «Horizon 2020» und der Laufzeit 2014–2020) deckt von der Grundlagenforschung über angewandte Forschung, technologische Entwicklung, Innovation und Demonstrationsprojekte bis zum Markteintritt (namentlich von kleinen und mittleren Unternehmen) praktisch die gesamte Wertschöpfungskette ab. Es beinhaltet eine Vielzahl verschiedener Förderinstrumente für alle Disziplinen (u. a. Gesundheit, Lebensmittel, Informationstechnologie inkl. Digitalisierung, Energie, Verkehr inkl. Luft- und Raumfahrt, Umwelt und Klima, Bioökonomie, Sicherheit, Geistes- und Sozialwissenschaften). Das EU-Forschungsrahmenprogramm («FRP», Budget in den Jahren 2014–2020 von rund 80 Mrd. EUR) und das Forschungs- und Ausbildungsprogramm von Euratom («Euratom-Programm», Budget in den Jahren 2014–2020 von 1.6 Mrd. EUR) funktionieren komplementär und sind verknüpft: Während im Rahmenprogramm sämtliche nicht-nukleare Energieforschung unterstützt wird, fördert das Euratom-Programm (vgl. Ziff. 2.2 dieses Berichts) ausschliesslich die nukleare Forschung.

Die Schweiz beteiligt sich am FRP, am Euratom-Programm und an der Forschungsinfrastruktur ITER («Horizon-2020-Paket») in der Periode 2014–2020 gemäss dem Assoziierungsabkommen zwischen der Schweiz und der EU vom 5. Dezember 2014. Sie zahlt für ihre Teilnahme einen Pflichtbeitrag an die EU, der proportional zum Gesamtbudget und zum BIP-Verhältnis zwischen der Schweiz und der EU berechnet wird. Im Gegenzug können sich Schweizer Forschende aus Forschungsinstitutionen und der Privatwirtschaft an den Ausschreibungen des FRP und des Euratom-Programms beteiligen. Die Mittel werden kompetitiv an die Konsortien mit dem besten Projektvorschlag vergeben.

Horizon 2020 unterstützt die Energieforschung hauptsächlich durch den Schwerpunkt **«Sichere, saubere und effiziente Energie»**. Die Tätigkeiten im Rahmen dieses Schwerpunktes bilden das strategische Rückgrat der europäischen Energie- und Klimapolitik und sind eng mit den Zielen und Strategien des SET-Plans (Strategic Energy Technology Plan der Europäischen Union) abgestimmt. Gefördert werden Projekte, die auf die Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Energiequellen angesichts zunehmender Ressourcenknappheit, stetig steigender Energiebedarfe und des weiter voranschreitenden Klimawandels unter wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen abzielen.

In diesem Forschungsschwerpunkt wurden insgesamt mehr als 10'000 Beteiligungen an über 1000 Projekten mit über 4 Milliarden CHF gefördert. Schweizer Teilnehmende konnten in 257 Beteiligungen 143 Millionen an Fördermitteln sichern (siehe Tabelle 2). Die Aufstellung berücksichtigt keine EU-Projekte mit Energiebezug in anderen Programmteilen wie z.B. dem European Research Council.

Tabelle 2: Übersicht der wichtigsten Forschungsbereiche im Horizon 2020 Schwerpunkt «Sichere, saubere und effiziente Energie» und der Schweizer Beteiligungen.

Forschungsbereiche	Anzahl Schweizer Beteiligungen	Verpflichtete Beiträge zugunsten Schweizer Institutionen (Mio. CHF)
Kostengünstige, kohlenstoffarme Energieversorgung	83	58.5
Senkung des Energieverbrauchs und CO2-Fussabdrucks	30	10.4
Intelligentes Europäisches Stromnetz	24	15.3
Brennstoffzellen zur Stromproduktion	16	6.9
Energieeffizienz der Wasserstoffproduktion	14	6.6
Grosse Energiespeicher	11	8.0
Wasserstoff zur Systemintegration erneuerbarer Energiequellen	9	6.7
Erneuerbare Energie wie Geothermie, Meeres-, Wasserkraft	8	4.1
Alternative Kraftstoffe und Energiequellen	6	3.0
Solarenergiesysteme	6	2.8
CO2-Abscheidung, Transport und Lagerung	6	2.0
Windenergie	4	9.2
Smarte Städte und Gemeinde	4	1.6
Weitere	36	8.3
Total	257	143

Zusätzlich wurden 4,6 Millionen CHF an Schweizer Forschende in vier Beteiligungen (ab 2020) in einer themenübergreifenden Ausschreibung zur **Batterieforschung** ("Batterien der nächsten Generation") vergeben. Weiter sind auch Forschungsbereiche in den Schwerpunktthemen «Intelligenter, umweltfreundlicher und integrierter Verkehr», «Klimaschutz, Umwelt, Ressourceneffizienz und Rohstoffe» oder «Nanotechnologien, fortschrittliche Materialien, Biotechnologie, fortschrittliche Herstellung und Verarbeitung» energierelevant.

Schliesslich ermöglicht die Teilnahme an Horizon 2020 Schweizer Akteure des öffentlichen und privaten Sektors den Zugang zu europäische Programme zur **Förderung erneuerbarer Energien und der Energieeffizienz auf der lokalen und regionaler Eben**, wie z.B. die gemeinsame Initiative der Europäischen Investitionsbank und der Europäischen Kommission ELENA (Europäisches Finanzierungsinstrument für nachhaltige Energieprojekte von Städten und Regionen), die Investitionsprogramme in den Bereichen Energieeffizienz, nachhaltiges Wohnen und Stadtverkehr und Mobilität fördert, oder ManagEnergy, ein Programm, das Energieagenturen unterstützt, um die Transformation des Energiesystems zu fördern und die Investitionen in nachhaltige Energie in Regionen und Städten zu erhöhen.

2. Nukleare Sicherheit gewährleisten

2.1 Fachkräfteangebot auf Jahrzehnte hinaus sicherzustellen

Nach dem Reaktorunfall von Fukushima haben Bundesrat und Parlament in 2011 beschlossen, schrittweise aus der Kernenergie auszusteigen. Auch mit dem beschlossenen Ausstieg **bleibt der Bedarf an Fachkräften für die kommenden Dekaden allerdings hoch** (siehe Anhang 3). Dies betrifft neben der vorläufigen Weiterführung der bestehenden Anlagen bis zum Ende des Betriebszeitpunkts verschiedene weitere Bereiche, wie die Lagerung des radioaktiven Abfalls und insbesondere auch der Rückbau der Anlagen, welcher spezifische neue Kompetenzen erfordert. Dabei braucht es Spezialistinnen und Spezialisten wie Strahlenschutzfachkräfte, Strahlenschutztechniker und -Technikerinnen, Strahlenschutzsachverständige, Chemiker/-innen, Physiker/-innen und IT-Spezialisten/-Spezialistinnen, aber auch Fachkräfte (z.B. Elektrotechniker/-innen), die im Hinblick den Umgang mit Nukleartechnik hin geschult werden. Überdies benötigen die Aufsichts- und Bewilligungsbehörden (neben der Aufsichtstätigkeit auch für Technologiemonitoring und internationale Zusammenarbeit) oder die Anwendung von Nukleartechnologien in der Medizin und in der Industrie in Zukunft hochspezialisierte Fachkräfte. Mit dem beschlossenen Ausstieg wird es allerdings **zunehmend schwieriger, die notwendigen qualifizierten Arbeitskräfte zu rekrutieren und zu halten**, wie auch die kommende Generation von Nuklearingenieuren/-ingenieurinnen auszubilden.

Die Schweiz verfügt nach wie vor über eine recht stabile nukleare Belegschaft in Industrie, Forschung und Regulierung sowie über kerntechnische Anlagen von Weltrang. Allerdings beschränkt sich die Ausbildung in nuklearen Kernthemen auf ein Programm an der ETH Zürich, der EPFL und dem PSI. Die Ausbildung des Betriebspersonals der Kernkraftwerke findet nur an der Schule für Strahlenschutz am Paul Scherrer Institut (PSI) statt. Die ETH Zürich und die EPF Lausanne bieten gemeinsam mit dem PSI seit 2008 ein Joint Masterprogramm «Nuclear Engineering» an. Das Programm ist kompatibel mit den durch das European Nuclear Engineering Network (ENEN) definierten Standards. Es ist hauptsächlich auf die Nutzung der Kernspaltung zur Energiegewinnung ausgerichtet, erlaubt den Studierenden aber auch, Kenntnisse zur Kernfusion und zu medizinischen und anderen industriellen Anwendungen der Nukleartechnik in Wahlfächern zu erwerben. Die fachliche Ausrichtung ist stark multidisziplinär und umfasst alle relevanten Themengebiete von Urangewinnung bis Rückbau und Entsorgung mit Schwerpunkt auf der Reaktorsicherheit. Die Ausbildung erlaubt einen nahtlosen Eintritt in wissenschaftlich-technische Bereiche der Branche (bisher haben etwa 120 Absolventen den Abschluss erworben) oder den Übertritt in ein Doktoratsprogramm (am PSI sind jeweils bis zu 40 Doktorierende im Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit tätig). Der Rückbau nuklearer Anlagen ist im Masterprogramm mit einem vollen Vorlesungszyklus eingebettet. Es werden die Aspekte "Costs & Financing", "Planning", "Dismantling" und "Waste Management" behandelt. Die Entsorgung ist ebenfalls Bestandteil der Vorlesung "Nuclear Energy Systems" an der ETH Zürich, dort mit Fokus auf hochaktiven Abfall. Lehrveranstaltungen wie Reaktorphysik, Strahlenschutz, Radiobiologie und Reaktortechnologie schaffen die grundlegenden Voraussetzungen für das Verständnis der besonderen Probleme beim Rückbau. Weitere Vorlesungsangebote (durch Dozenten des PSI) bestehen an der Universität Bern: Master-Kurs «Geological Disposal of Radioactive Waste»; Radiochemie-Grundlagen und Transaktiniden-Physik für Studierende im Grundstudium.

Grosse Expertise im Strahlenschutz und Kompetenzen im operationellen Rückbau findet man konzentriert in der Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit des PSI, sowie am Institut für Radiophysik (IRA) in Lausanne. Mitarbeitende dieser Institutionen üben Dozententätigkeiten in der Strahlenschutzausbildung aus und betreuen regelmässig Masterstudierende oder Doktorierende. Programme, die sich mit den sozioökonomischen Auswirkungen der Kernenergie, mit dem Faktor Mensch oder mit Risikostudien befassen, sind spärlich und nur bruchstückhaft an einigen Fachhochschulen zu finden. Eine institutionalisierte Zusammenarbeit zwischen den ETH-Bereichen und den Fachhochschulen existiert in diesem Rahmen nicht.

Im Bereich Forschung ist auch die Endlagerforschung zentral. Diese, seit mehr als 20 Jahren andauernde Forschungstätigkeit, tritt nun in die letzte Stufe des sog. Sachplans Geologische Tiefenlager und wird voraussichtlich in 2030 mit der Erteilung der Rahmenbewilligung für die Errichtung eines geologischen Tiefenlagers abgeschlossen sein. In diesem Prozess spielen neben der NAGRA auch der ETH-Bereich (insbesondere PSI) und die Universität Bern eine wichtige Rolle. Die Schweiz hat hier bei der Erschliessung und Errichtung eines Endlagers eine führende Position.

Auch wenn derzeit diverse Ausbildungsprogramme existieren, besteht aus Expertensicht die Sorge, dass diese Ausbildungsplattformen in naher Zukunft unzureichend werden könnten (siehe Anhang 3). Die Aufrechterhaltung des höchsten Niveaus an nuklearer Sicherheit erfordert daher die **Stärkung der Kompetenzen in zwei Bereichen**.¹

Erstens können die Nachwuchskräfte im akademischen Bereich nur motiviert werden, wenn **vertiefte Forschungsaktivitäten an der Spitze der Ingenieurwissenschaften** und mit Unterstützung einer wissenschaftlichen Infrastruktur von Weltklasse erhalten werden. Dies erfolgt derzeit – wie beschrieben – im Rahmen des ETH-Bereichs.

Seitens des Bundes wird die Forschung komplementiert mit einer Förderung von Themen in für die Energiestrategie zentralen Bereichen mit einem Fokus auf anwendungsorientierte Forschung und Umsetzung (siehe zu SWEET Kapitel 1). Dabei werden die Themenbereiche kritische Energieinfrastrukturen (einschliesslich nukleare Sicherheit und Entsorgung) in Koordination mit dem Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) explizit berücksichtigt.

Zweitens ist im Zusammenhang mit den anstehenden Rückbauaufgaben von Kernkraftwerken das **Angebot an technischen Fachkräften im Berufs- und Weiterbildungsbereich sicherzustellen**. Zu diesem Zweck existieren im nuklearen Bereich in der Höheren Berufsbildung zwei vom SBFI genehmigte Abschlüsse:

Berufsprüfung	Trägerschaft
Kernkraftwerk-Anlageoperateurin mit eidgenössischem Fachausweis / Kernkraftwerk-Anlageoperateur mit eidgenössischem Fachausweis	- Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE
HF-Diplom	Trägerschaft
dipl. Technikerin HF Grossanlagenbetrieb / dipl. Techniker HF Grossanlagenbetrieb	- swissnuclear - Konferenz Höhere Fachschulen Technik (KHF-T)

In der Trägerschaft der beiden Abschlüsse sind die relevanten Organisationen der Arbeitswelt der Branche im nuklearen Bereich vertreten. Die Trägerschaft eines Abschlusses definiert das Berufsprofil, also die für den Arbeitsmarkt erforderlichen Kompetenzen. Sofern Bedarf besteht, die Inhalte der Berufsprofile anzupassen oder ein neues Berufsprofil zu entwickeln, kann eine Trägerschaft einen entsprechenden Antrag beim SBFI stellen. Das SBFI ist Genehmigungsinstanz der Abschlüsse und begleitet wie unterstützt ein solches Vorhaben im Rahmen der regulären Strukturen und Prozesse.

Die Berufsprüfung Kernkraftwerk-Anlageoperateurin / Kernkraftwerk-Anlageoperateur existiert seit über 30 Jahren, wurde allerdings 2017 revidiert. Das Berufsbild umfasst u.a. die erforderlichen Handlungskompetenzen hinsichtlich «Betrieb» und «Nichtbetrieb» des Kernkraftwerks. Die Trägerschaft hat im Jahr 2017 festgehalten, dass die erforderlichen Handlungskompetenzen hinsichtlich «Phase Rückbau» zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden.

¹ Das Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 (KEG) nennt in Artikel 31 und 91 explizit die Forschung als wichtigen Aspekt für die Problematik des nuklearen Abfalls. Zudem wird in Artikel 86 eine Bundeskompetenz im Bereich Forschung und Ausbildung bezeichnet.

Das Berufsprofil der dipl. Technikerin HF Grossanlagenbetrieb / dipl. Techniker HF Grossanlagenbetrieb ist in einem Rahmenlehrplan verankert. Dieser Rahmenlehrplan wurde 2015 vom SBFI genehmigt. Aufgrund der Verordnung des WBF vom 11. September 2017² über Mindestvorschriften für die Anerkennung von Bildungsgängen und Nachdiplomstudien der höheren Fachschulen (MiVo-HF) unterliegen alle genehmigten Rahmenlehrpläne einer Befristung und sind nun alle sieben Jahre zu aktualisieren. Das Revisionsprojekt des Rahmenlehrplanes Grossanlagenbetrieb hat Anfang 2020 gestartet. Die Trägerschaft des Abschlusses kann anlässlich dieser Revision bei Bedarf neue oder weitere Kompetenzen ins Berufsprofil einfließen lassen.

Bei beiden Abschlüssen hat die Trägerschaft die Vorgaben des ENSI zu beachten, insbesondere auch hinsichtlich erforderlichen Kompetenzen, die im Berufsprofil zu verankern sind.

Bezüglich der erforderlichen Kompetenzen finden somit im Bereich Berufsbildung laufend Anpassungen statt, um die Sicherheit der Anlagen zu gewährleisten. Es bestehen zwar nach wie vor zahlreiche offene Fragen bezüglich des Bedarfs im Hinblick auf den Rückbau; allerdings sind ausreichende Gefässe verfügbar, um nach Bedarf neue Profile definieren zu können oder bestehende Profile anzupassen.

2.2 Nukleare Sicherheit als Anliegen der internationalen Kooperation

Während sich, wie in Kapitel 1 aufgezeigt, die Aufwendungen der öffentlich finanzierten Energieforschung in der Schweiz - im relativen Anteil an den Gesamtaufwendungen gemessen - von Nukleartechnik hin zu Erneuerbaren Energien verlagert hat, hat für die Gewährleistung nuklearer Sicherheit die internationale Forschung und Zusammenarbeit an Bedeutung gewonnen.

La Suisse participe depuis 1978 aux activités de recherche de l'UE dans le domaine nucléaire. Elle est formellement associée au programme de recherche et de formation d'Euratom depuis 2004. Les recherches qui y sont conduites portent sur les applications **tant énergétiques que non-énergétiques** de la fusion et de la fission nucléaire.

Les recherches en fission nucléaire poursuivies dans ce cadre portent principalement sur **l'exploitation sûre et le démantèlement des centrales existantes, la gestion des déchets radioactifs et la réparation des dommages environnementaux** engendrés par les installations nucléaires. Le programme couvre également les applications des technologies nucléaires et des rayonnements ionisants à des fins médicales, industrielles et de recherche ainsi que la préparation aux situations d'urgence. Enfin, le **maintien et le développement de l'expertise et de compétences** dans le domaine de la recherche nucléaire est promu en soutenant l'enseignement, la formation et la mobilité et en favorisant le transfert de technologies de la recherche vers l'industrie. Le programme de recherche d'Euratom contribue aussi aux activités nucléaires du Centre commun de recherche de la commission européenne qui fournit conseils scientifiques indépendants et appui pour la mise en œuvre des politiques européennes dans les domaines de la sûreté nucléaire, de la gestion de déchets radioactifs, de la radioprotection, de la sécurité nucléaire, des garanties et de la non-prolifération (siehe Anhang 4).

La participation de la Suisse au programme de recherche d'Euratom assure l'intégration de la recherche nationale dans le contexte international et contribue à l'engagement de la Suisse à améliorer la sûreté nucléaire au niveau international (conformément notamment à la Convention sur la sûreté nucléaire).

Die Schweiz ist, neben der nuklearen Sicherheit, auf vielen weiteren nuklearen Gebieten bei der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) und der Nuklearen Energiebehörde (NEA/OECD) engagiert, um auch die Kompetenzen des Bundes (BFE) mittel- und längerfristig zu erhalten. Dies ist unter anderem ein Auftrag der verabschiedeten Energiestrategie 2050.

² SR 412.101.61

Neben der nuklearen Sicherheit gibt es den Tätigkeitsbereich der nuklearen Sicherung (Nuclear Security). Bei der nuklearen Sicherung geht es um die physische Sicherung von nuklearen Material, wie z.B. der Schutz von Kernanlagen gegenüber terroristischen Angriffen oder die Verhinderung von Anschlägen mit nuklearem Material, durch sogenannte «dirty bombs». Die Schweiz wird für die kommenden Jahrzehnte weiterhin Kernkraftwerke betreiben und muss einen bestmöglichen Schutz dieser Kernanlagen gewährleisten. Deshalb ist sie auf eine Forschungszusammenarbeit in diesem Bereich mit der IAEA angewiesen. Die IAEA ist die wichtigste internationale Behörde und hat per Mandat eine Koordinationsfunktion innerhalb der nuklearen Sicherung für alle Mitgliedsländer.

Gleichzeitig engagiert sich die Schweiz im wissenschaftlich technischen Anwendungsbereich und leistet zusammen mit der IAEA wertvolle Grundlagenforschung. Aktuell hat die IAEA die Schweiz mit zwei «Collaboration Center» ausgezeichnet. Zum einen im Bereich der Nuklearen Sicherheitsreaktorforschung zusammen mit der EPFL und zum anderen im Bereich der Nuklearen Forensik mit dem Labor Spiez. Eine weitere Kooperation wurde 2019 mit der Eawag und der IAEA gegründet, um die Vorhersagbarkeit von sauberem Trinkwasser in Entwicklungsländern massgeblich zu verbessern. Diese Datenbank steht den Entwicklungsländern zur Verfügung und somit leistet die Schweiz einen Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen (SDG) der Vereinten Nationen (UN).

Die Schweiz ist parallel dazu an etlichen Forschungsprojekten und Studien zusammen mit der NEA/OECD beteiligt. Das Bekannteste und mit dem grössten Impact ist das «NEST» Programm in Kooperation mit dem Paul-Scherrer-Institut (PSI). Bei dem NEST (Nuclear Education, Skills and Technology (NEST) Framework geht es um die Schaffung und den Transfer von Wissen für die nukleare Sicherheitsforschung sowie die Ausbildung von Fachkräften. Mit beiden Agenturen, IAEA und NEA, pflegt die Schweiz intensiven Kontakt um auch für den kommenden Rückbau von Kernanlagen, beginnend mit dem KKW Mühleberg, genügend Kompetenz zu besitzen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schweiz für die kommenden Jahre und Jahrzehnte auf einen Kompetenzerhalt sowie –ausbau im wissenschaftlichen Bereich der Nukleartechnik angewiesen ist, um handlungs- und urteilsfähig zu bleiben.

3. Evaluation des Potenzials neuer nuklearer Technologien³

Die bestehenden Kernkraftwerke in der Schweiz dürfen in Betrieb bleiben, solange sie sicher sind, nach ihrer Abschaltung aber nicht ersetzt werden. Es gibt jedoch kein Technologieverbot: Die Nuklearforschung wird mit der Energiestrategie 2050 nicht eingeschränkt. Es gilt daher, weiterhin auch in der Erforschung neuer Technologien aktiv zu bleiben, damit deren Potenzial zur Minderung der Treibhausgasemissionen beurteilt werden kann. In Anbetracht der aktuellen Herausforderungen bei der Bewältigung der Klima- und Energieproblematik ist es wichtig, sich alle Optionen offen zu halten. Dies gilt auch für nukleare Technologien. On distinguera entre les recherches dédiées d'une part aux applications existantes et futures de la fission nucléaire et d'autre à la fusion nucléaire (siehe Anhang 4).

Auch die Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE) sieht den Erhalt der wissenschaftlichen Kompetenz in der Nuklearforschung als wichtig an, sie empfiehlt den Erhalt der Kompetenz und daher die Förderung der Nuklearforschung. Sie hat darum sicherheitsrelevanten Forschungsfragen in der Nuklearforschung (Betrieb alter Kernkraftwerke, sicherer Rückbau, sichere Ein- und Endlagerung etc.) bei

³ Dieser Abschnitt behandelt nur die Erforschung neuer nuklearer Technologien; andere neue Technologien, auf die sich das Schweizer Energiesystem und seine Forschung derzeit stützt, werden nicht thematisiert.

der Aktualisierung des Energieforschungskonzepts für die Periode 2021 bis 2024 mehr Gewicht gegeben als im aktuellen Energieforschungskonzept.⁴

Die Schweizer Forschenden sollen sich aus Sicht der CORE an den offenen Forschungsfragen beteiligen, ihr Wissen einbringen und die Entwicklung der Forschung verfolgen. Ziel muss es sein, dass die Schweiz ihre eigenen Expertenurteile über das Potenzial neuer Reaktortypen machen kann, welches die Forschung jedoch erst ergründen muss. Dabei müssen neue Reaktortechnologien und die damit verbundenen Brennstoffkreisläufe kontinuierlich unter den Gesichtspunkten der nuklearen Sicherheit, der Nachhaltigkeit und der Abfallminimierung bewertet werden.

3.1 Recherches en fission nucléaire

Die heutige zweite Generation von Anlagen wie auch die dritte Generation, welche derzeit installiert wird, verwenden Uran als Brennelement. Die Verwendung von Uranbrennstoff geht mit einer Reihe von Problemen einher. Dazu zählen die Langlebigkeit des radioaktiven Abfalls, die Komplexität der Reaktorsicherheit, die Risiken im Zusammenhang mit der Verbreitung von Atomwaffen, die hohen Kosten der Anfangsinvestitionen und die langfristig begrenzten Uranressourcen.

Heute wird international an verschiedenen Konzepten einer neuen Generation von Anlagen geforscht, die diese Probleme weitgehend beheben könnten.⁵ An die verschiedenen, unter dem Begriff der vierten Generation zusammengefassten Typen von Anlagen werden (in unterschiedlichem Mass) die folgenden Anforderungen gestellt:

- Die Anlagen sind bereits konstruktionsbedingt sicherer, so dass die Möglichkeit einer unkontrollierten Spaltungsreaktion ausgeschlossen werden kann.
- Es entsteht eine wesentlich geringere Menge an radioaktiven Abfällen. Besonders die langlebigen, hochradioaktiven Abfälle werden reduziert.
- Die Produktion ist möglichst Klima-neutral in dem Sinne, dass der CO₂-Ausstoss möglichst gering ist (mit jener der Wasserkraft vergleichbar).
- Die erforderlichen Ausgangsmaterialien sind in grossen Mengen verfügbar.
- Ein wirtschaftlicher Betrieb führt zu deutliche tieferen Kosten im Vergleich zu den heutigen Anlagen, so dass die Produktion wettbewerbsfähiger ist. Dies ist bedingt durch weniger komplexe Sicherheitsanforderungen, leicht verfügbares Spaltmaterial, grössere Modularität (kleinere Anlagen möglich), tiefere Investitionskosten, tiefere Kosten für die Lagerung und eine höhere Energieeffizienz.

Darüber hinaus besteht die prinzipielle Möglichkeit, die von den derzeitigen Kraftwerken erzeugten und bestehenden langlebigen Abfallprodukte wiederzuverwenden. Gewisse Typen der vierten Generation könnten somit auch als Atommüllverbrennungsanlagen (mit oder ohne Energieerzeugung) eingesetzt werden. Zudem sind diese neuen Technologien grundsätzlich in der Lage, abgebrannte Kernbrennstoffabfälle vor geologischen Tiefenlagerung in Elemente mit kürzerer Lebensdauer umzuwandeln (Transmutation). Die dafür erforderlichen Prozesse werden derzeit erforscht. Es gibt dazu verschiedene Ansätze; ein mögliches Beispiel findet sich im Expertenbericht in Anhang 5.

Diese skizzierten Vorteile sind jedoch derzeit zu weiten Teilen Möglichkeiten, welche im Bereich der Grundlagenforschung untersucht werden. Vollständig gelöst werden dürften die Herausforderungen und Probleme der Klima-Neutralität und des entstehenden Abfalls auch im Rahmen der neuen Anlagen nicht. Neben den Vorteilen bestehen bei solchen Anlagentypen überdies auch Nachteile im Hinblick

⁴ Im Hinblick auf die Energieproduktion sind die Nuklearenergie und radioaktiven Abfällen daher einer von fünf Forschungspfeilern im Energieforschungskonzept; neben erneuerbaren Energien/natürlichen Ressourcen, Bioenergie, Geoenergien, Solarbrennstoffen- und -materialien.

⁵ Das Gen-IV Forum, welchem auch die Schweiz angehört, hat 6 Typen von Reaktoren ausgewählt, für welche die Forschung priorisiert werden soll. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40465/generation-iv-systems

auf die dringenden Herausforderungen der Energie- und Klimapolitik. Dazu zählen die lange, weitere Entwicklungszeit, neue radioaktive Abfalltypen und erforderliche Entsorgungstechniken und die damit verbundenen Forschungsfragen.

Die Schweiz kann in einigen Teilbereichen der Forschung zur vierten Generation eine wichtige Rolle spielen, namentlich in den sogenannten "beschleunigergetriebenen Systemen", bei welchen ein Reaktor mit einem Teilchenbeschleuniger gekoppelt wird, und bei den sogenannten «Salzschmelzereaktoren», die prinzipiell ebenfalls über ein hohes Transmutationspotenzial und ausgezeichnete Sicherheitseigenschaften verfügen. Dies, weil die in der Schweiz vorhandenen Kompetenzen zur Nutzung von Teilchenbeschleunigern, insbesondere am PSI und an den ETH, auch im Kontext der Generation-IV-Anlagen zur Beherrschung kritischer Elemente genutzt werden kann. An den Schweizer Universitäten gibt es auch andere Fachgebiete von Relevanz, insbesondere für Hochleistungs-Flüssigmetalltargets, die Auslegung von schnellen Neutronenreaktorkernen usw.

Es liegt im Interesse der Schweiz, sich an internationalen Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Hinblick auf die vierte Generation und die Transmutation zu beteiligen. Neue Reaktortypen müssen kontinuierlich unter den Gesichtspunkten Sicherheit, Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Reduzierung des radioaktiven Abfalls bewertet werden, damit die Schweiz deren Potential für die Energieversorgung der Zukunft beurteilen kann.

Auf internationaler Ebene spielt für den Erhalt dieser Kompetenzen die Beteiligung am Forschungs- und Ausbildungsprogramm von Euratom eine zentrale Rolle. Die Beteiligung gewährleistet die Integration der nationalen Forschung in den internationalen Kontext.

3.2 Recherches en fusion nucléaire

Ebenso wie die Forschung zur vierten Generation möglicher Kernkrafttypen ist die Fusionsforschung derzeit nach wie vor im Bereich der Grundlagenforschung anzusiedeln. L'enjeu principal des recherches en fusion nucléaire est le développement des technologies nécessaires à l'exploitation de cette réaction en tant que source d'énergie intrinsèquement sûre, ne générant pratiquement pas de CO₂ et de déchets radioactifs dangereux à long terme et virtuellement illimitée. Complétant les énergies renouvelables, la fusion nucléaire devrait apporter dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle une réponse durable aux besoins énergétiques d'une société écologiquement durable et au bilan carbone neutre. Active dans ce domaine depuis les années 1960, la Suisse participe aujourd'hui activement à ces recherches aux niveaux global, européen et national.

Au **niveau global**, la recherche en fusion nucléaire est actuellement focalisée sur la construction du réacteur thermonucléaire international ITER à Cadarache, en France. La réalisation de cette installation hors-normes a pour objectif principal de démontrer l'intérêt de la fusion nucléaire pour la production d'énergie à échelle industrielle et d'ouvrir la voie à la construction d'un réacteur de démonstration connecté au réseau électrique. Alors que 67% de la construction était accomplie à la fin 2019, ITER devrait entrer en service dès 2025. Les expériences nucléaires décisives sont attendues vers 2035. La Suisse participe à la réalisation d'ITER en tant que membre de l'entreprise commune européenne conjointe Fusion for Energy, chargée de livrer la contribution de l'Europe à ITER.

Au **niveau européen**, les activités de Fusion for Energy sont complétées par les recherches conduites dans le cadre du volet dédié à la fusion nucléaire du programme de recherche et de formation d'Euratom (siehe Anhang 4). Ces travaux mettent à profit des infrastructures existantes afin à préparer l'exploitation d'ITER et la construction de futures centrales électriques à fusion en développant les connaissances, systèmes, matériaux et technologies nécessaires.

Membre de Fusion for Energy et associée au programme de recherche et de formation d'Euratom, la Suisse participe très activement à ces recherches. Le Swiss Plasma Center (SPC à EPFL) héberge l'un des trois tokamaks sélectionnés par le consortium EUROfusion pour l'exécution du programme de recherche en fusion nucléaire d'Euratom. Egalement impliqué dans la réalisation d'ITER, les activités des

quelques 140 employés du Swiss Plasma Center couvrent les tokamaks, les outils de diagnostic, les systèmes de chauffage et de confinement, la modélisation et simulation numérique des plasmas ainsi que les applications de la physique des plasmas et de la supraconductivité. Le SPC exploite notamment SULTAN, la seule machine au monde capable de tester et qualifier les éléments supraconducteurs qui seront installés sur ITER. Le Département de physique de l'Université de Bâle conduit, lui, des recherches concernant les interactions entre plasma et parois des réacteurs.

Anhang 1

Auswertung Statistik öffentlich finanzierte Energieforschung in der Schweiz

Staatssekretariat für Bildung, Forschung
und Innovation SBFJ

Abteilung Forschung und Innovation

Einleitung

Die Herausforderungen für die Energieforschung liegen im Spannungsfeld zwischen langfristigen Perspektiven und Visionen und kurzfristigen, wirtschaftlichen und politischen Realitäten. Die Entwicklung von Energietechnologien und -systemen benötigt viel Zeit von der Grundlagenforschung bis zu deren Einführung. Die Verbindung langjähriger Forschungsprogramme mit der Förderung über Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte soll den Transfer hin zu marktreifen Technologien ermöglichen und beschleunigen.

Der vorliegende Anhang zeigt Struktur und Entwicklung der öffentlich finanzierten Energieforschung (Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte) in der Schweiz auf. Diese Ausgaben werden vom BFE erhoben und umfassen sowohl die Grundfinanzierung der Energieforschung an den Hochschulen (ETH-Bereich, Fachhochschulen, Universitäten) als auch projektgebundene Mittel (Förderung von BFE, EU, KTI/Innosuisse, SNF usw.). Dabei ordnet das BFE jährlich mehr als 1'500 Projekte thematisch ein und wertet die Zahlen statistisch aus. Die Erhebung erfolgt über Abfragen von Datenbanken des Bundes (insb. Aramis), des SNF (p3) und der EU (Cordis), Analyse von Jahres- und Geschäftsberichten sowie über eine Selbstdeklaration der Forschungsverantwortlichen der Forschungsstätten.¹

1. Gesamtaufwendungen

In der Schweiz wurden im Jahr 2018 seitens der öffentlichen Hand für die Energieforschung rund 404 Mio. CHF (0,6 % des BIP) aufgewendet. Die teuerungsbereinigten Ausgaben haben sich in den vergangenen zehn Jahren in etwa verdoppelt. Gemessen am BIP wurde damit der ehemalige Höchststand, welcher zu Beginn der 1990er Jahre erreicht wurde, in den letzten drei Jahren übertroffen (Abbildung 1). Allerdings waren die Aufwendungen 2018 im Vergleich zum Vorjahr leicht rückläufig.²

¹ BFE (2018): "Energieforschung und Innovation".

² Zu beachten ist bei allen Abbildungen, dass in der Statistik bei internationalen Programmen nur die Rückflüsse in die Schweiz erfasst werden, nicht aber die Zahlungen an diese Programme. Es werden daher keine netto Zu- oder Abflüsse dargestellt. Korrekt dargestellt sind Aktivitäten in der Schweiz; die dargestellten Gesamtaufwendungen können demgegenüber von den tatsächlichen Zahlen abweichen, je nachdem, wie die Nettoflüsse in den Programmen in den jeweiligen Jahren ausfallen.

Ausgaben und Rückflüsse EU Programme und ITER (in Mio. CHF)

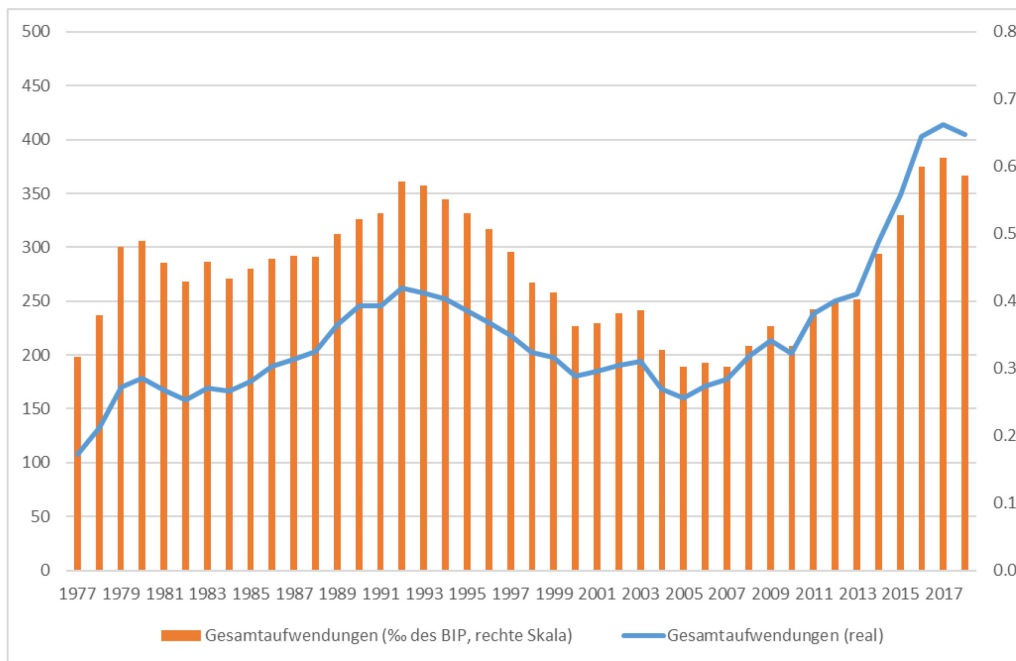
Energierrelevante EU Programme 2014-2019	Einbezahlt	Rückfluss
Euratom Fusion	38.2	32.0
Euratom Fission*	42.5	13.7
H2020 Gesellschaftliche Herausforderung: Secure, clean and efficient energy	102.8**	68.6***
H2020 Gesellschaftliche Herausforderung: Secure, clean and efficient energy, Projektweise Beteiligung	74.8	74.8
Total EU Programme	258.4	189.1
ITER (Bauphase 2007-2019)	259.9	190.4

*Enthält auch die Beiträge an den Joint Research Centre JRC, wo kein Rückfluss beziffert werden kann.

**Der einbezahlte Betrag ist eine Schätzung basierend auf den prozentualen Anteil für den Programmteil «Secure, clean and efficient energy» im Horizon 2020 Budget (7.70%) und der Schweizer Pflichtbeiträge an alle Programmteile. Die Aufstellung berücksichtigt keine EU-Projekte mit Energiebezug in anderen Programmteilen wie z.B. dem European Research Council. Während der Phase der projektweisen Beteiligung (2014-2016) wurden keine Beiträge an den Gesellschaftliche Herausforderung (Pillar 3) bezahlt.

***Der finale Rückfluss kann erst nach Abschluss aller Projekte berechnet werden. Einige Projekte der Ausschreibungen aus dem Jahr 2019 haben zudem noch keinen Vertrag und sind somit noch nicht in der Datenbank erfasst.

Abbildung 1: Gesamtaufwendungen der öffentlichen Hand für die Energieforschung in der Schweiz (in Mio. CHF)



Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018 / BFS

Der starke Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass die Schweizer Energieforschung – insbesondere im Zusammenhang mit der «Energierategie 2050» und dem «Aktionsplan Energieforschung» – in den letzten Jahren stark ausgebaut wurde. Dazu beigetragen haben namentlich:³

- (1) Der Aufbau von nationalen Kompetenzzentren in der Energieforschung durch die KTI/Innosuisse (Swiss Competence Center for Energy Research, SCCER) seit 2013, welche 2017 in die zweite Phase gestartet sind;
- (2) neue Nationale Forschungsprogramme des SNF im Energiebereich (NFP 70 Energiewende und NFP 71 Steuerung des Energieverbrauchs);
- (3) sowie ein gezielter Ausbau der Pilot- und Demonstrationsaktivitäten des Bundesamtes für Energie.

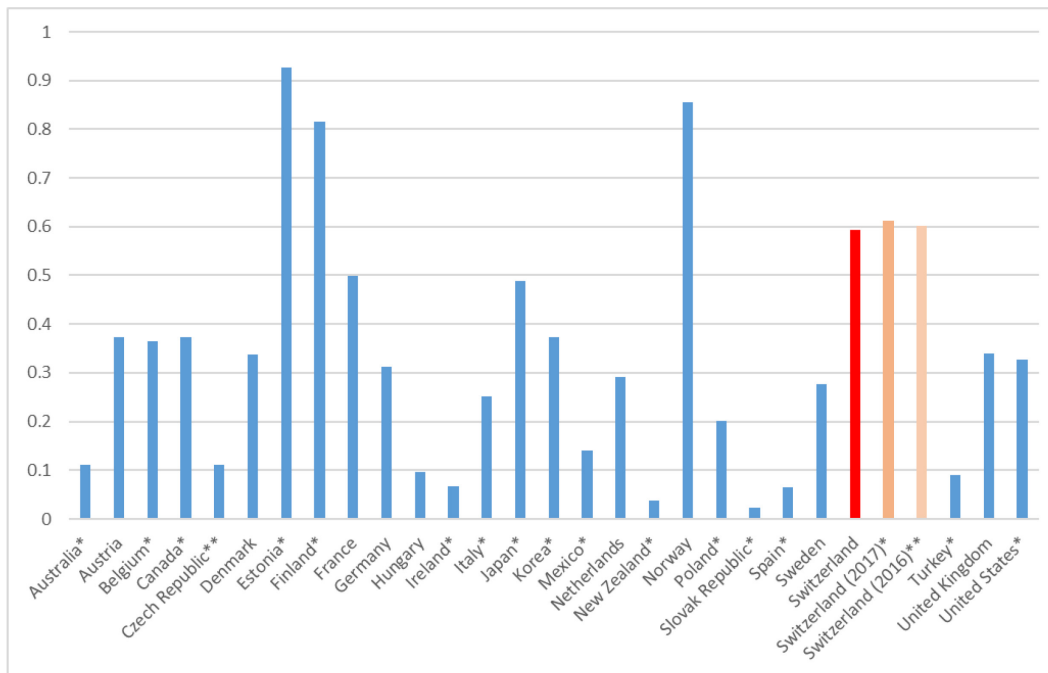
Zudem standen innerhalb des ETH-Rats zusätzliche Mittel für den Infrastruktur- und Kapazitätsausbau zur Verfügung (von 2013-2016 60 Mio. Franken), welche ebenfalls zum Zuwachs der Energieforschungsmittel beigetragen haben. Ferner wurde in der BFI-Periode 2013-2016 der Aufbau und Betrieb eines Zentrums für Photovoltaik am Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) im Umfang von rund 20 Mio. Franken unterstützt (vgl. Botschaft zur Förderung von Bildung, Forschung und Innovation in den Jahren 2017–2020).

Gemäss Statistik der Internationalen Energieagentur (IEA) lag die Schweiz in Bezug auf die öffentlichen Ausgaben für die Energieforschung im Jahr 2018 im internationalen Vergleich der Mitgliedsländer der IEA an vierter Stelle, hinter Norwegen, Estland und Finnland (Abbildung 2). Damit hat die Schweiz in den vergangenen Jahren relativ zu den

³ Ein Teil des Anstiegs geht auch auf Anpassungen in der Datenerfassung zurück (etwa eine konsistente Berücksichtigung des Overheads, welche Eigenleistungen des ETH-Bereich und von Universitäten ansteigen liessen).

Vergleichsländern die Ausgaben stärker erhöht; in der Statistik für das Jahr 2008 lag die Schweiz noch an achter Stelle.⁴

Abbildung 2: Internationaler Vergleich der öffentlichen Ausgaben für die Energieforschung (in ‰ des BIP; 2018)



* Daten für das Jahr 2017 / ** Daten für das Jahr 2016

Quelle: International Energy Agency

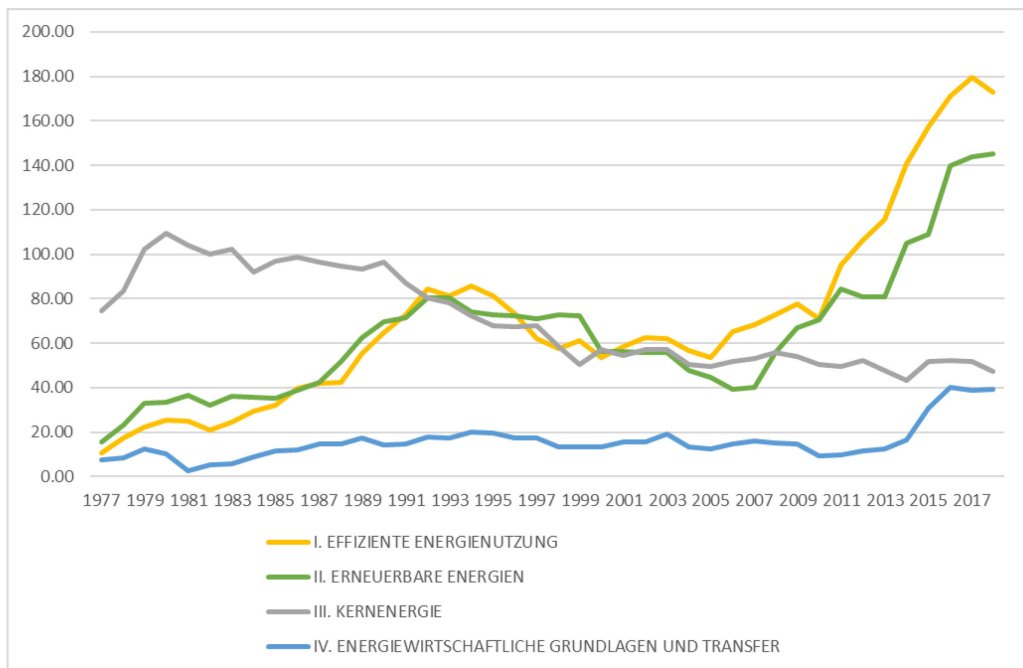
2. Forschungsschwerpunkte

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Aufwendungen für die Energieforschung seit Ende der 1970er Jahre (in Mio. CHF, teuerungsbereinigt) in den vier Hauptbereichen gemäss funktionaler Gliederung (Effiziente Energienutzung, Erneuerbare Energien, Kernenergie, Energiewirtschaftliche Grundlagen und Transfer). Hinsichtlich der Förderschwerpunkte zeigt sich seit etwa 2005 trendmässig eine starke Zunahme der Aufwendungen in den Forschungsbereichen Effiziente Energienutzung und Erneuerbare Energien, welche sich seit ca. 2011/2013 nochmals beschleunigt hat. Dies ist insbesondere auf das vermehrte Engagement des Bundes sowie des ETH-Bereichs, welche in diesen beiden Forschungsgebieten Schwerpunkte gesetzt haben, zurückzuführen.⁵ Seit dem Jahr 2014 wurde zudem die nicht-technische Energieforschung (Energiewirtschaftliche Grundlagen und Transfer) an den kantonalen Universitäten stark ausgeweitet.

⁴ Vgl. «Stand und Perspektiven Energieforschung». Bericht der Arbeitsgruppe Forschung im Rahmen der IDA Energie, 29. April / 12. Mai 2011.

⁵ SBFI (2016): «Synthese – Stand der Energieforschung in der Schweiz. Begleitbericht zuhanden der eidg. Räte»; SBF (2011): «Stand und Perspektiven Energieforschung»

Abbildung 3: Aufwendungen in den vier Forschungsschwerpunkten (real, in Mio. CHF)

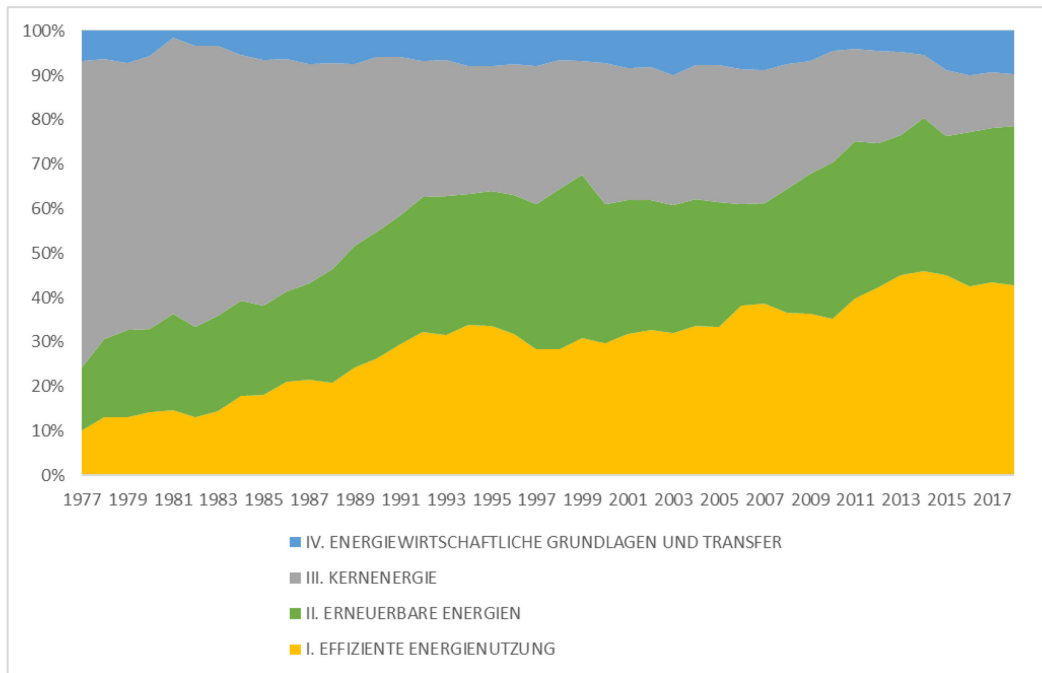


Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

Die Forschungsaufwendungen im Bereich der Kernenergie hatten im Zeitraum von Ende der 1970er Jahre bis etwa Ende der 1990er Jahre in absoluten Zahlen eine deutliche Reduktion zu verzeichnen; seitdem blieben sie jedoch annähernd konstant. Die Forschungsausgaben des vierten Förderschwerpunktes – der Energiewirtschaftlichen Grundlagen – haben sich in den 30 Jahren vor 2013 nur unwesentlich verändert; danach hat ebenfalls eine deutliche Erhöhung stattgefunden.

Die prozentualen Anteile der vier Themengebiete haben sich vor diesem Hintergrund in der längerfristigen Betrachtung stark verändert (vgl. Abbildung 4). Beispielsweise hat der Anteil für Forschung und Entwicklung im Bereich der Kernenergie (Fusion und Fission) an der gesamten öffentlichen Förderung von zu Beginn über 60% auf jüngst noch 12% abgenommen, jener für erneuerbare Energien hat von 14% auf 36% zugenommen. Die stärkste Steigerung verzeichnete der Anteil für die Effiziente Energienutzung mit einer Zunahme von 10% auf 43%.

Abbildung 4: Aufteilung der Aufwendungen gemäss den vier Forschungsschwerpunkten

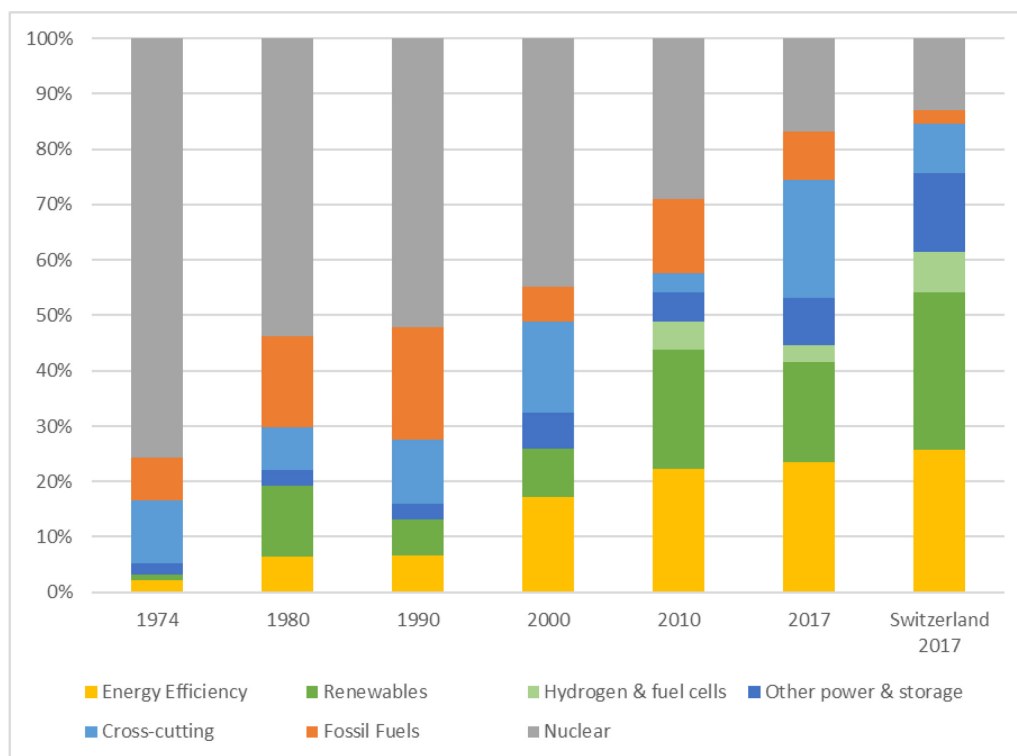


Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

In den übrigen Mitgliedsländern der IEA erfolgte eine ähnliche Änderung der Ausrichtung der Energieforschung. Abbildung 5 zeigt die funktionale Aufteilung gemäss IEA-Statistik für vergleichbare Angaben.⁶ Demgemäss hat die Schweiz etwa einen tieferen Anteil des Aufwandes für Kernenergieforschung (13% versus 17%) und fossile Energieträger (2% versus 9%), aber einen deutlich höheren Anteil für Erneuerbare Energien (29% versus 18%).

⁶ Die IEA verwendet eine andere Aufteilung als die Schweizer Statistik. Die Statistiken sind nur bei der Kernenergie direkt vergleichbar. Energieeffizienz und Erneuerbare Energien enthalten in der Schweiz auch Wasserstoff/Brennstoffzellen, während energiewirtschaftliche Grundlagen separat geführt wird. Letztere sind bei der IEA, wenn thematisch möglich, nicht in cross-cutting sondern in den entsprechenden Themenbereichen enthalten.

Abbildung 5: Aufteilung der Aufwendungen der öffentlichen Energieforschung in den IEA-Mitgliedsländern nach funktionaler Gliederung gem. IEA



Quelle: International Energy Agency

3. Herkunft und Zuteilung der Mittel

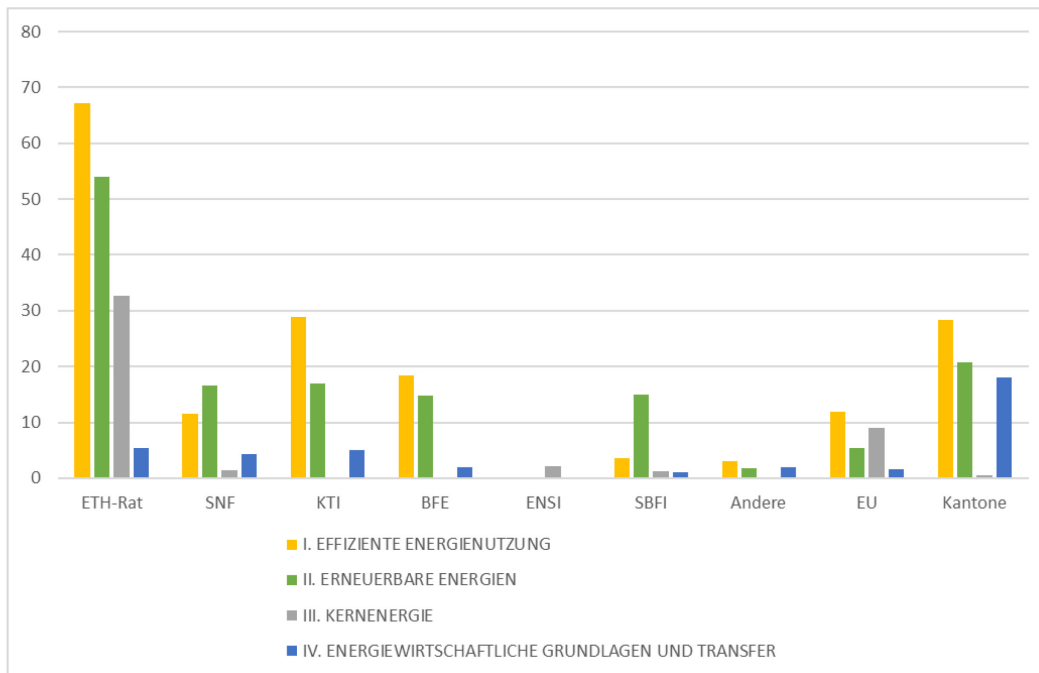
Von den öffentlichen Mitteln für die Energieforschung im Umfang von insgesamt rund 404 Mio. CHF im Jahr 2018 stammen rund 309 Mio. CHF (entspricht 76%) vom Bund, 68 Mio. CHF (17%) von den Kantonen und 28 Mio. CHF von der EU (7%, vergleiche Abbildung 6 und Abbildung 7).⁷ Auf Ebene des Bundes stammt der weitaus grösste Anteil vom ETH-Rat (159 Mio. CHF).

Je nach Herkunft der Mittel sind auch ganz unterschiedliche Schwerpunktsetzungen auszumachen. Im Bereich der Kernenergie ist etwa, neben den Aufwendungen, welche über die Beteiligung an EU-Programmen getätigt werden, einzig im ETH-Bereich ein substantieller Schwerpunkt in der Forschung zu finden. Demgegenüber setzen die Kantone neben den Schwerpunkten Effiziente Energienutzung und Erneuerbare Energien auch einen deutlichen Fokus auf Energiewirtschaftliche Grundlagen und Transfer. Dies liegt daran, dass nicht-technische Forschung eher an kantonalen Universitäten und Fachhochschulen betrieben wird und weniger im ETH-Bereich. Die kantonalen Mittel sind v.a. Mittel (Personalmittel) aus

⁷ Die genannten 28 Mio. CHF von der EU betreffen nur die Mittel aus Horizon 2020 und aus dem Euratom-Programm (ohne ITER), welche effektiv von der EU bezahlt wurden. Dabei ist zu beachten, dass die Mittel von Horizon 2020, welche im Jahr 2016 im Energiebereich bewilligt wurden, nach wie vor direkt vom Bund (SBFI) an Schweizer Forschende bezahlt wurden; sie erscheinen daher in den 309 Mio. CHF Bundesmitteln, obwohl es sich um Mittel im Rahmen von Horizon 2020 handelt. Dies aufgrund der bis 2016 laufenden Teilassoziiierung der Schweiz, welche dazu führte, dass nationale Massnahmen zur Finanzierung von Schweizer Projektbeteiligungen in den Bereichen von «Horizon 2020» zum Tragen kamen, in denen die Schweiz nicht assoziiert war.

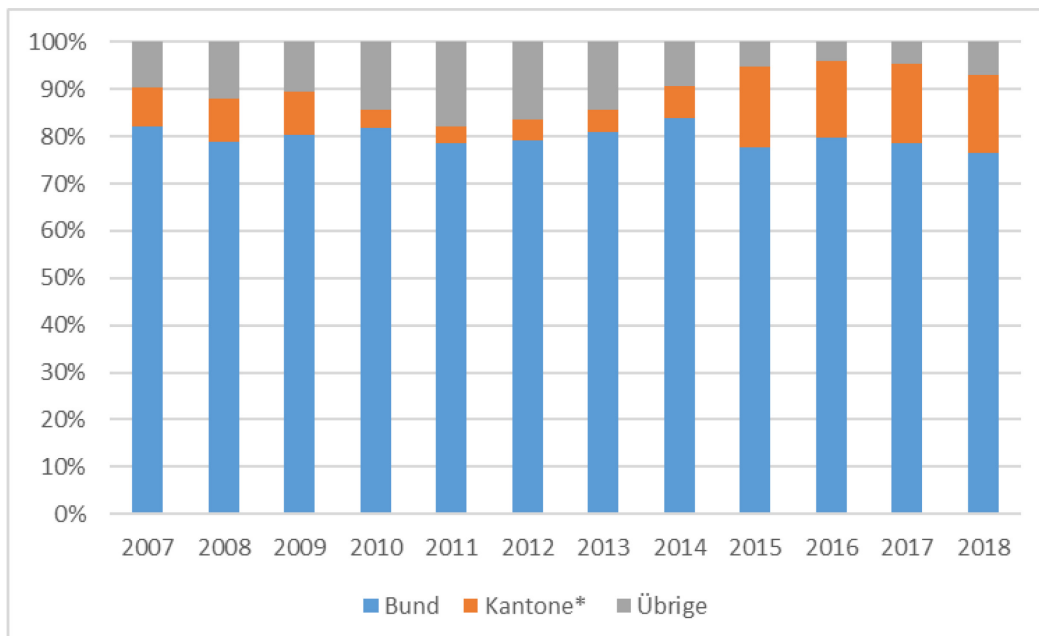
der Grundfinanzierung der Uni/FH durch den Kanton und stammen weniger aus kompetitiven Programmen (Drittmittel).

Abbildung 6: Herkunft der öffentlichen Mittel im Jahr 2018 und Aufteilung auf die vier Hauptbereiche gemäss funktionaler Gliederung (in Mio. CHF)



Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

Abbildung 7: Mittelherkunft: Aufteilung Bund und Kantone



*Bis 2014: Kantone und Gemeinden⁸

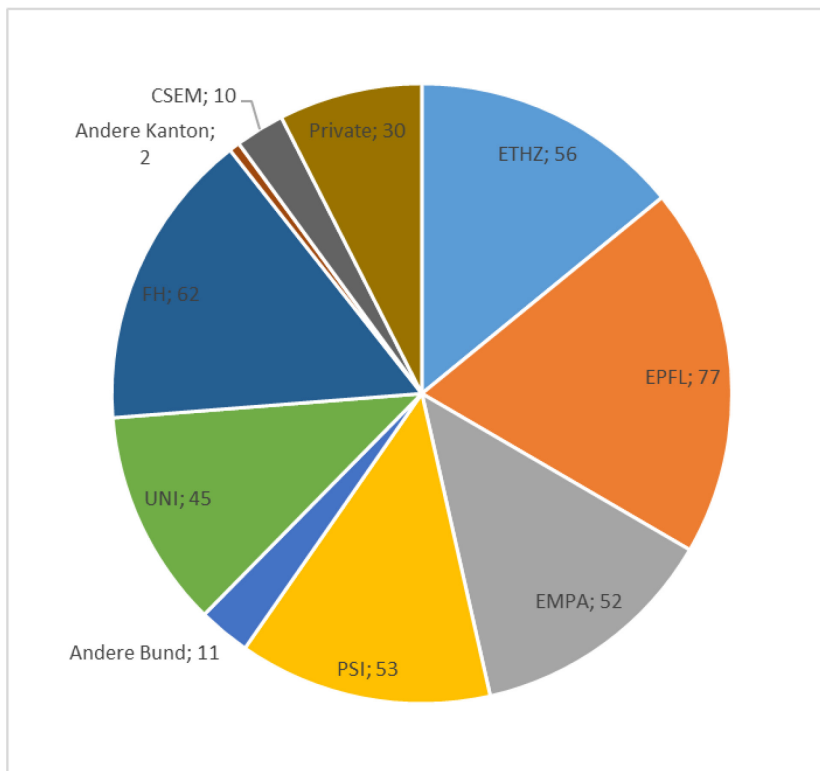
Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

⁸ Der Anstieg des Anteils der Kantone von 2014 auf 2015 geht in erster Linie auf die nicht konsistente Berücksichtigung des Overheads in den Vorjahren, insb. bei den kantonalen Universitäten und Fachhochschulen zwischen 2010 und 2014, zurück.

Empfänger

Im Jahr 2018 sind den Institutionen des ETH-Bereichs mit 238 Mio. CHF bzw. einem Anteil von 59% die grössten (öffentlichen) Forschungsmittel im Energiebereich zugekommen; im Vergleich zum Vorjahr ist dieser Anteil allerdings um rund 2 Prozentpunkte gesunken (9 Mio. CHF). Danach folgen die Fachhochschulen mit knapp 62 Mio. CHF bzw. 15% und die Universitäten mit 45 Mio. CHF, resp. 11% (vgl. Abbildung 8). Die Privatwirtschaft hat öffentliche Beiträge von 30 Mio. CHF erhalten, wobei es sich insbesondere um Pilot- und Demonstrationsprojekte (19 Mio. CHF) handelt, deren Ergebnisse und Erkenntnisse spezifisch von der Industrie aufgenommen werden sollen.

Abbildung 8: Verwendung der öffentlichen Mittel durch die verschiedenen Forschungsstätten im Jahr 2018 (in Mio. CHF)

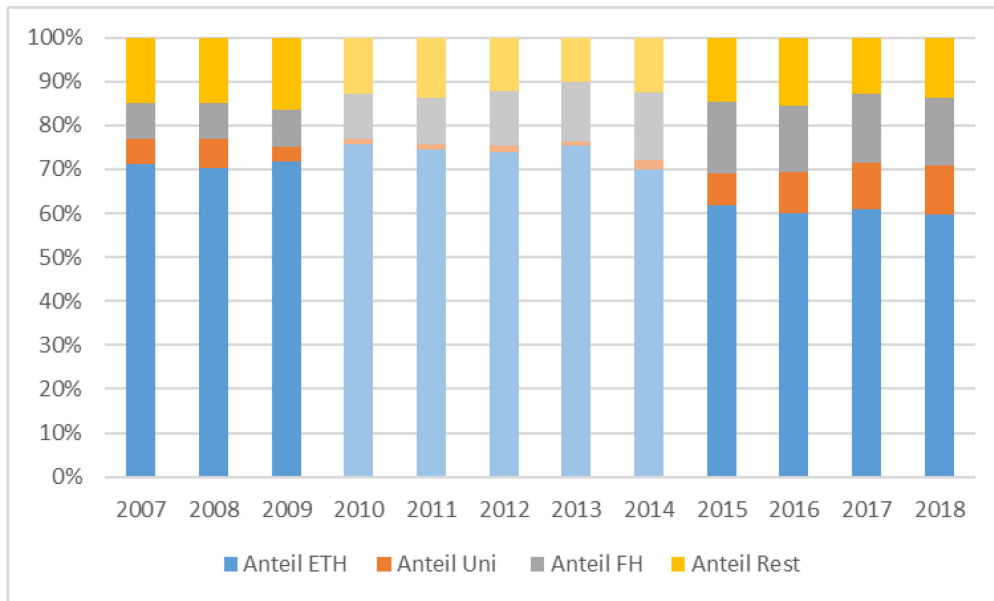


Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

Im zeitlichen Verlauf hat sich die Energieforschungslandschaft in der Schweiz deutlich diversifiziert. Wurden im Zeitraum vor 2010 noch über 70% der Ausgaben im Bereich Energieforschung im ETH-Bereich getätigt, hat sich dieser Anteil bis 2018 auf 59% reduziert (Abbildung 9).⁹ Gründe hierfür sind unter anderem der Aufbau der SCCER sowie die Tatsache, dass in letzter Zeit auch die anwendungsorientierte Grundlagenforschung vollständiger in die Statistik einbezogen wurde, welche sehr stark an den kantonalen Universitäten vorangetrieben wird.

⁹ Auf den Vergleich der einzelnen Jahre sollte in dieser Abbildung wegen der verschiedenen Anpassungen in der Berücksichtigung des Overheads nicht zu viel Gewicht gelegt werden. Bis 2009 und ab 2015 wurden diese zwar unterschiedlich aber jeweils konsistent berücksichtigt. Daher sind diese Zeiträume quantitativ vergleichbar.

Abbildung 9: Entwicklung Empfängeranteile ETH, Universitäten und Fachhochschulen

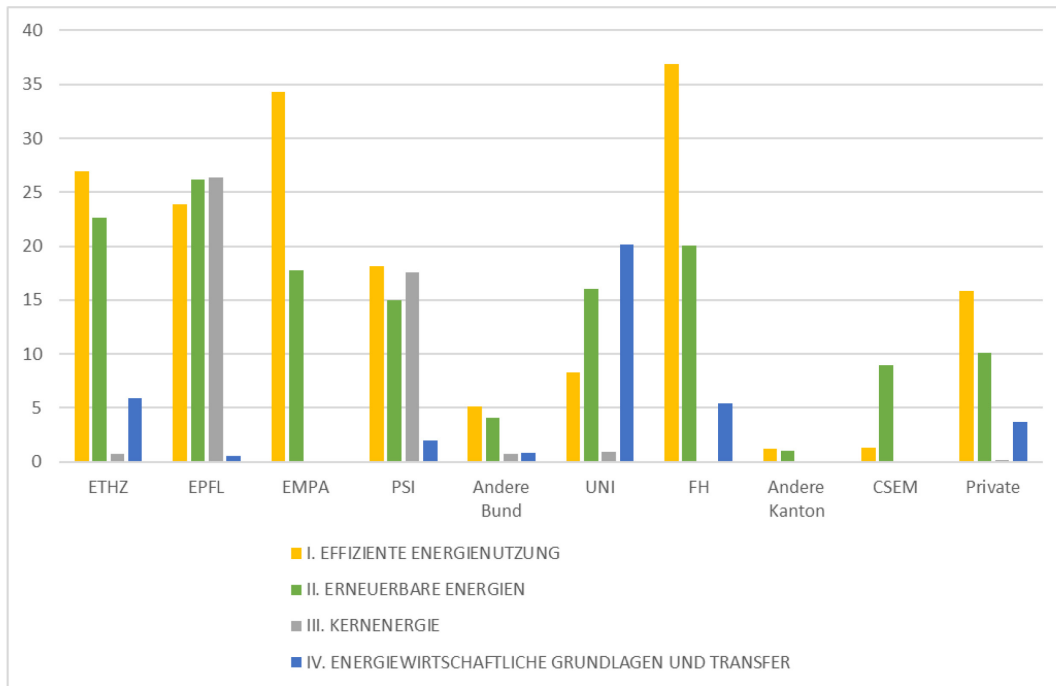


Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

Auch in der funktionalen Aufteilung entlang der vier Forschungsbereiche bestehen deutliche Unterschiede zwischen den forschenden Institutionen (Abbildung 10). So wird die Kernenergieforschung nahezu ausschliesslich an der EPFL und dem PSI durchgeführt. Demgegenüber wird der grösste Aufwand für Forschung im Bereich der Effizienten Energienutzung an den Fachhochschulen und an der EMPA getätigt (wobei im Vergleich im ETH-Bereich die Teilschulen / Forschungsanstalten einzeln betrachtet werden).

Die Universitäten setzen schliesslich den Hauptschwerpunkt auf die nicht-technische Energieforschung (Energiewirtschaftliche Grundlagen und Transfer). Dass sich die Energieforschung vor allem im Bereich der nicht-technischen Forschung diversifiziert hat, dürfte auch damit zusammenhängen, dass die Kernenergieforschung kostspielige und schwer verschiebbare Infrastrukturen benötigt. Diese werden bei der Forschung zu Erneuerbaren Energien und zur Energieeffizienz in deutlich kleinerem Ausmass oder gar nicht benötigt.

Abbildung 10: Verwendung der öffentlichen Mittel durch die verschiedenen Forschungsstätten im Jahr 2018, aufgeteilt auf die vier Hauptbereiche gemäss funktionaler Gliederung (in Mio. CHF)



Quelle: BFE: Energieforschungsstatistik 2018

Anhang 2

Förderprogramm Energie Innosuisse

Innosuisse - Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Innosuisse – Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung**

Bericht Förderprogramm Energie Innosuisse

Inhaltsverzeichnis

1	Förderprogramm Energie	1
2	Fördermassnahme Kompetenzzentren SCCER	2
3	Ziele der SCCER	2
4	Finanzielle Rahmenbedingungen	3
5	Entwicklung der SCCER in der 2. Phase 2017-20	4

1 Förderprogramm Energie

Nach der Reaktorkatastrophe von 2011 in Japan beschlossen der Bundesrat und das Parlament den schrittweisen Ausstieg aus der nuklearen Energie-Produktion. Dies erfordert eine wesentliche Reduktion des Energieverbrauchs und eine Produktionserhöhung erneuerbarer Energien um nicht die Erreichung anderer wichtiger Ziele im Bereich Klimaschutz oder Raumplanung zu gefährden.

Vor diesem Hintergrund beschloss der Bundesrat in seiner Botschaft vom 17. Oktober 2012 zum Aktionsplan «Koordinierte Energieforschung Schweiz» – Massnahmen für die Jahre 2013–2016¹. Die Energieforschung soll gestärkt werden, um Lösungen für die Herausforderungen bereitzustellen, die sich aus dem Umbau des Energiesystems ergeben. Die beantragten Massnahmen berücksichtigen die Grundlagenforschung, legen das Hauptgewicht aber auf die anwendungsorientierte Forschung und das Nutzen ihrer Resultate für die Innovationsförderung.

2013 bewilligte das Parlament CHF 202 Millionen, um den Aktionsplan umzusetzen. Dieser sah im Rahmen des kompetitiven Förderprogramms Energie vor, dass nebst einer Verstärkung der Innovations-Projektförderung im Energiebereich (CHF 46 Mio.), die damalige Kommission für Technologie und Innovation (KTI) und der Schweizerische Nationalfonds (SNF) sogenannte **Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER)** (CHF 72 Mio.) aufbauen. Dabei sieht das Programm Grundbeiträge für den akademischen Kapazitätsaufbau sowie für den Betrieb der Zentren vor.

2016 beschlossen Bundesrat und Parlament das Förderprogramm Energie in den Jahren 2017-2020 mit weiteren CHF 139.2 Mio. zu unterstützen. Die positive Entwicklung der Zusammenarbeit zeigt sich zudem in der Initialisierung grosser, interdisziplinärer Projekte (z.B. die sechs SCCER-übergreifenden Joint Activities, welche mit CHF 7.7 Mio. unterstützt werden) sowie gemeinsamer Pilot- und Demonstrationsanlagen (z.B. ESI-Plattform, REel Demo). So werden nicht nur der Kapazitätsaufbau nachhaltig wirken, sondern auch die errichteten Infrastrukturen über das Ende des Förderprogramms Energie hinaus bestehen bleiben.

Der Bericht «Herausforderungen der Digitalisierung für Bildung und Forschung in der Schweiz»² zeigte die Notwendigkeit von zusätzlichen Massnahmen auf, um die Potentiale der Digitalisierung im Energiebereich bestmöglich nutzen zu können. Aus diesem Grund werden in den Jahren 2019-20 zwei SCCER mit einer stärkeren Fokussierung auf die Digitalisierung weitergeführt. Dabei sollen u.a. wichtige Forschungskompetenzen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien aufgebaut sowie der Wissens- und Technologietransfer beschleunigt werden. Dafür stehen in diesem Zeitraum CHF 3 Millionen zur Verfügung.

¹ <https://www.admin.ch/opc/de/federal-gazette/2012/9017.pdf>

² https://www.sbf.admin.ch/...digitalisierung.../bericht_digitalisierung_d.pdf

2 Fördermassnahme Kompetenzzentren SCCER

Ein SCCER ist ein nationaler Verbund von Hochschulinstituten und Kooperationspartnern aus Wirtschaft und Verwaltung in einem Aktionsfeld. 2013 und 2014 entstanden in sieben Aktionsfeldern (Effizienz, Netze, Speicherung, Strombereitstellung, Sozio-Ökonomie, Mobilität und Biomasse) acht SCCER (zwei im Bereich «Effizienz»). Die SCCER unterstützen das **Hauptziel der Forschungsförderung, Lösungen zu Problemstellungen zu finden, welche durch die Energiestrategie 2050 entstehen**.

Ein SCCER soll:

- Die Grundlagenforschung in jenen Teilgebieten stärken und/oder aufbauen, wo eigene Anstrengungen für die nachhaltige Umsetzung der Energiestrategie 2050 nötig sind;
- Vor allem in der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung die potenziell wirksamsten Ideen und Ansätze fördern;
- Den Transfer der Forschungsergebnisse in den Markt sicherstellen.

3 Ziele der SCCER

Das übergeordnete Ziel des Aktionsplans «Koordinierte Energieforschung Schweiz» ist es, in der Schweiz durch Forschung und Innovation wesentliche Beiträge zur **Effizienzsteigerung des Energiesystems Schweiz** und zur **Deckung des Strombedarfs** nach Wegfall der nuklearen Stromerzeugung zu leisten.

Konkrete wesentliche Ziele der SCCER auf der Basis des Aktionsplans sind:

- **Nachhaltige Stärkung der Energieforschung** in der Schweiz zur Unterstützung einer erfolgreichen Umsetzung der neuen Energiepolitik;
- **Ausbau der Forschungskapazitäten** im ETH-Bereich, an Fachhochschulen und Universitäten über eine gezielte Förderung von Fachpersonen mit Hochschulausbildung, angefangen bei Studierenden über Doktorierenden, Postdocs bis hin zu Professorinnen und Professoren;
- **Nachhaltige Optimierung der Strukturen der Energieforschung** in der Schweiz durch Förderung der Arbeitsteilung und Koordination unter den Forschungsinstitutionen;
- **Intensivierung der anwendungsorientierten Forschung** im Rahmen von Innovationsprojekten mit Beteiligung der Schweizer Industrie.

4 Finanzielle Rahmenbedingungen

Zu Beginn des Programms wurden verschiedene finanzielle Richtlinien festgelegt, die die SCCER während ihrer Laufzeit einhalten mussten bzw. müssen. Zwei der wichtigsten Vorgaben, welche auf dem Aktionsplan Koordinierte Energieforschung basieren, werden nachfolgend dargelegt:

Finanzierungsquellen

Der **Jahresbeitrag der Innosuisse darf höchstens 40 Prozent der gesamten jährlichen Aufwendungen** eines SCCER oder einer Joint Activity betragen. Die restlichen Aufwendungen werden zu je mindestens 20 Prozent über kompetitive Drittmittel des Bundes, über andere Drittmittel und über Eigenmittel der Hochschulforschungsstätten finanziert (siehe Tabelle 1). Von diesen Vorgaben kann abgewichen werden, wenn dies aufgrund der Zusammensetzung eines SCCER oder einer Joint Activity oder aufgrund der massgeblichen Forschungsschwerpunkte notwendig ist. Evaluiert wird die Vorgabe der Finanzierungsquellen anhand der folgenden Angaben:

Tabelle 1: Richtwert nach Finanzierungsquellen

Direkter SCCER Beitrag Innosuisse	Referenzwert	100%
Eigene Mittel der Hochschulen	Mindestens	50%
Kompetitive Bundesmittel (BFE, SNF, Innosuisse, ...)	Mindestens	50%
Drittmittel (Industrie, EU, ...)	Mindestens	50%

Wie in Tabelle 2 ersichtlich, haben die SCCER die Rahmenbedingung der Finanzierungsquellen im Zeitraum 2017-2019 grösstenteils erreicht. Die im Jahr 2017 gestarteten Joint Activities erreichen die angestrebten 50% bei den kompetitiven Bundesmitteln und/oder den weiteren Drittmitteln zurzeit nicht. Gesamtheitlich über die zweite Förderperiode wird das Ziel über das gesamte Förderprogramm Energie erreicht werden.

Tabelle 2: Erreichung der Richtwerte nach Finanzierungsquellen 2017-19

	Beitrag Innosuisse	Eigene Mittel der Hochschulen	Kompetitive Bundesmittel	Drittmittel (Industrie, EU, ...)
FEEB&D	100%	137%	68%	66%
EIP	100%	138%	127%	97%
FURIES	100%	103%	78%	73%
HaE	100%	138%	75%	80%
SoE	100%	155%	112%	59%
CREST	100%	169%	56%	66%
Mobility	100%	93%	117%	81%
BIOSWEET	100%	149%	65%	91%
Total SCCER	100%	135%	85%	74%
RED	100%	103%	129%	54%
CEDA	100%	84%	89%	47%
SaM	100%	103%	31%	49%
CREST-Mobility	100%	113%	101%	22%
IDEA	100%	84%	21%	49%
P2X*	100%	125%	84%	15%
Total Joint Activities	100%	99%	73%	42%
Total	100%	132%	84%	72%

*Die Joint Activity P2X wurde in den Jahren 2017-18 finanziert.

Sie muss die Ziele der Finanzierungsverhältnisse nicht erreichen.

Finanzierungsrichtwerte für Fachhochschulen sowie Universitäten

Zum Zwecke der Sicherung einer grösstmöglichen Integration von Fachhochschulen sowie Universitäten in die Kompetenzzentren wurden gemäss Aktionsplan für die erste Phase 2013-16 gewisse Richtwerte vorgesehen. Von den CHF 62 Mio. (ohne Betriebsbeitrag von CHF 10 Mio.) sollen **maximal CHF 40 Mio. an die ETH, mindestens CHF 12 Mio. an die Fachhochschulen und CHF 10 Mio. an die Universitäten** fließen. Die zweite Phase sieht keine konkreten Vorgaben vor, jedoch soll die grösstmögliche Integration von Fachhochschulen und Universitäten weiterhin berücksichtigt werden.

Die in Tabelle 3 ersichtlichen Beiträge der Innosuisse an die Fachhochschulen und Universitäten zeigen auf, dass in der zweiten Phase die Integration der Fachhochschulen und Universitäten weiterhin grösstmöglich berücksichtigt wird. Im Zeitraum 2017-19 erhielten die Fachhochschulen CHF 22.4 Mio. und die Universitäten CHF 14.4 Mio. an Fördermitteln.

Tabelle 3: Innosuisse-Beiträge pro Hochschultyp von 2017-2019 in CHF

in CHF	ETH	UAS	UNI	Total
FEED&D	5'276'376	1'635'350	958'010	7'869'736
EIP	2'035'172	1'554'922	327'524	3'917'618
FURIES	6'141'748	5'341'534	933'030	12'416'311
HaE	7'249'234	2'622'575	1'705'774	11'577'582
SoE	8'830'283	1'259'250	2'660'467	12'750'000
CREST	2'689'761	2'476'537	6'481'440	11'647'738
Mobility	7'467'518	3'340'096	180'001	10'987'615
BIOSWEET	4'659'598	3'290'397	-	7'949'995
Total SCCER	44'349'690	21'520'660	13'246'245	79'116'596
RED	358'628	327'750	-	686'378
CEDA	1'187'052	45'999	-	1'233'051
SaM	915'553	155'753	459'258	1'530'564
CREST-Mobility	547'753	297'588	377'419	1'222'759
IDEA	625'010	83'766	291'467	1'000'243
P2X	46'518	30'648	38'250	115'416
Total Joint Activities	3'680'514	941'504	1'166'393	5'788'411
Total	48'030'204	22'462'165	14'412'638	84'905'007

5 Entwicklung der SCCER in der 2. Phase 2017-20

Während der ersten Förderperiode (2013-2016) haben die SCCER **erfolgreich Forschungskapazitäten aufgebaut und damit eines ihrer wichtigsten Ziele erreicht bzw. sogar übertroffen**. In der zweiten Förderperiode (2017-2020) wurden die Forschungskapazitäten konsolidiert und in spezifischen Fokusbereichen weiter aufgebaut. Dieser Auf- und Ausbau von Forschungskapazitäten stärkt die Energieforschung in der Schweiz nachhaltig und ermöglicht eine Vielzahl an neuen Forschungsprojekten. Der steigende wissenschaftliche Output beinhaltet ein grosses Potential für die erfolgreiche Umsetzung der Energiestrategie 2050. Zusätzlich etabliert sich das wachsende Netzwerk erfolgreich unter den teilnehmenden Hochschulen sowie den Partnern aus der Wirtschaft und Verwaltung.

Ende 2019 waren 1458 Forscher (914.5 FTE³) in den Kompetenzzentren tätig (siehe Tabelle 4). Die Hälfte der involvierten Forscher sind Doktoranden und wissenschaftliche Mitarbeiter.

Tabelle 4: Entwicklung SCCER-Forschungskapazitäten von 2014 bis 2019 in FTE

2019										
FTE Financial Report	FEED&D	EIP	FURIES	HaE	SoE	CREST	Mobility	BIOSWEET	Joint Activity	Total
Professor	2.4	3.5	4.4	4.4	5.2	9.4	4.0	3.5	3.8	40.7
Assistant Professor / Lecturer	1.3	1.2	0.1	2.4	5.9	13.2	0.1	3.3	2.6	30.1
Senior Researcher	21.1	5.7	22.0	22.8	30.2	10.3	25.0	14.4	8.8	160.2
PostDoc	13.8	6.2	21.7	28.9	28.5	28.6	22.8	12.2	6.7	169.5
Technician	1.3	0.7	4.7	6.7	2.4	1.1	5.0	11.0	3.4	36.3
PhD student / Scientific Assistant	27.9	34.1	89.0	78.8	53.1	49.2	68.3	43.4	21.7	465.5
other	3.3	0.1	0.1	3.0	0.7	2.6	1.3	0.5	1.0	12.4
Total	71.1	51.4	141.9	147.0	125.9	114.4	126.5	88.3	48.0	914.5

2018										
FTE Financial Report	FEED&D	EIP	FURIES	HaE	SoE	CREST	Mobility	BIOSWEET	Joint Activity	Total
Professor	2.0	2.4	2.9	2.8	5.4	8.9	3.3	3.5	3.4	34.7
Assistant Professor / Lecturer	1.9	-	0.5	3.3	4.1	15.5	0.3	2.8	1.2	29.6
Senior Researcher	13.1	5.4	17.7	21.9	25.4	9.2	21.2	15.9	8.0	137.6
PostDoc	11.2	3.7	16.6	24.1	35.1	27.2	21.4	11.6	10.9	161.8
Technician	2.6	0.2	2.0	3.9	3.2	1.1	3.3	10.1	2.1	28.4
PhD student / Scientific Assistant	34.6	41.5	84.1	70.5	77.4	52.1	64.2	36.1	25.7	486.2
other	0.1	0.2	0.1	3.7	1.0	0.5	2.3	0.8	1.4	9.9
Total	65.5	53.4	123.8	130.2	151.6	114.5	115.9	80.8	52.6	888.1

2017										
Total	71.0	49.5	126.4	131.8	161.0	127.0	123.8	72.7	48.6	911.9

2016										
Total	64.9	40.4	108.5	103.3	173.0	119.9	109.9	65.5	-	785.2

2015										
Total	69.6	40.8	94.1	92.6	160.5	121.6	91.1	57.5	-	727.9

2014										
Total	66.4	27.0	69.9	87.1	121.4	81.6	61.1	58.9	-	573.4

Die SCCER lancierten im Jahr 2019 über 220 neue Projekte. Dies entspricht einer Steigerung von 15% im Vergleich zu 2018. **Rund 70% der neuen Projekte werden mit einem Umsetzungspartner aus der Wirtschaft oder dem öffentlichen Sektor durchgeführt.** Auch die Anzahl der genehmigten Projekte mit internationaler Beteiligung hat zugenommen.

Die hohe Komplexität des Energiesystems und das Bedürfnis nach kohärenten Forschungsansätzen können mit den interuniversitären Forschungsgemeinschaften zielgerichtet angegangen werden. Dieser Ansatz stellt einen wesentlichen Nutzen für die wichtigen Kooperationen mit der Industrie dar. Die zunehmende Anzahl an Kontakten und gemeinsamen Projekten zwischen den Hochschulen und Umsetzungspartnern sowie das Wachstum bei Prototypen und P+D Anlagen deuten auf eine weitere Intensivierung beim Wissens- und Technologietransfer hin.

Das Förderprogramm Energie ermöglicht es neue Forschungsgemeinschaften zu vereinen und vorhandene Barrieren zwischen den Forschungsinstitutionen abzubauen. In den vergangenen sechs Jahren ist die **Zusammenarbeit in den SCCER zwischen den verschiedenen Hochschultypen stark intensiviert worden.** Diese interuniversitäre Zusammenarbeit wurde von vielen Anspruchsgruppen als ein zentraler Mehrwert des Förderprogramms genannt. Auffallend ist die **zunehmend wichtige Rolle der Fachhochschulen** in der Energieforschung. Die Fachhochschulen werden als wichtige Partner mit spezifischen Fähigkeiten angesehen und arbeiten vermehrt mit dem ETH-Bereich zusammen.

³ Full Time Equivalent

Was bei den SCCER in den letzten Jahren zu beobachten war ist nun bei den Joint Activities ersichtlich. Diese interdisziplinären und SCCER-übergreifenden Projekte werden die gewünschte Systemorientierung in der Energieforschungslandschaft unterstützen und stärken. Die Vorteile der interdisziplinären Zusammenarbeit, mit Einbezug der zentralen Rolle der sozioökonomischen Wissenschaften, ist einer der Schlüsselfaktoren für den Erfolg des Förderprogramms und dessen Einfluss auf die Energiestrategie 2050.

Das SCCER Programm wird vom Evaluationspanel unter anderem **durch die wachsende Systemorientierung als einzigartig in der internationalen Energieforschung angesehen**. Das SCCER Konzept bedeutet einen Mehrwert bei der Schaffung von zusätzlichen Forschungskapazitäten, der Koordination und engeren Zusammenarbeit in der Energieforschung. Zusätzlich wird ein positiver Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 generiert.

Die Finanzierung der SCCER war **als Anschubfinanzierung ausgestaltet**. Die Hochschulen verpflichteten sich, die aufgebauten Kapazitäten weiterzuführen. Damit wird nicht nur der Kapazitätsaufbau nachhaltig wirken, sondern die errichteten Infrastrukturen werden über das Ende des Förderprogramms Energie hinaus bestehen bleiben.

Den Konsortien stehen für die zukünftige Finanzierung ihrer Vorhaben weiterhin die bestehenden Förderinstrumente der Innosuisse, wie z.B. die Förderung der Innovationsprojekte und NTN Innovation Booster, zur Verfügung.

Anhang 3

Preserving Competence in Nuclear Technology and Managing its Legacies

Prof. Dr. Andreas Pautz

Head of the Nuclear Energy and Safety Division, Paul Scherrer Institut (PSI)
Professor for Nuclear Engineering, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Preserving Competence in Nuclear Technology and Managing its Legacies

Author: Andreas Pautz, Head of the Nuclear Energy and Safety Division at the Paul Scherrer Institut (PSI), and Professor for Nuclear Engineering at École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

1. Motivation and the Grand Challenge

With the acceptance of the Swiss Energy Act through the Swiss voters in May 2017, and the approval of the first set of measures of the Energy Strategy 2050 (E2050), the new build of nuclear power plants (NPP) is now explicitly prohibited by law, and the ultimate phase-out of nuclear power generation in Switzerland has become reality. However, the remaining lifetime of the five Swiss power plants is, according to the Swiss body of nuclear regulations, not limited as long as compliance with highest safety standards can be demonstrated. In practice this means that operation of up to 60 years of lifetime (and possibly even beyond) is permitted. At least for the two most recent NPP of Switzerland, i.e. the Gösgen (KKG) and the Leibstadt (KKL) power plant, a life-time extension to 60 years is a technically feasible and economically viable option, which would defer the expected shutdown date of KKG until 2039, and of KKL even until 2044. But also for the two oldest units of Switzerland, Beznau 1 and Beznau 2 (KKB1/KKB2), continued operation well past the middle of the next decade is a likely scenario. On the other hand, the Mühleberg plant (KKM) has, by management decision of the utility BKW, definitely ceased power generation in 2019 and entered into the post-operation and decommissioning phase, after 47 years of operation.

Given these facts, several challenges have become imminent simultaneously: maintaining the highest level of nuclear safety for an ageing fleet of operating NPP, and managing the nuclear legacy with its technological and procedural complexities. The latter includes:

- the safe decommissioning and dismantling of an NPP,
- the long-term intermediate storage of spent fuel,
- the waste conditioning procedures, the transport cask certification, and the waste disposal.

Moreover, Switzerland is entering a crucial phase of the siting process for the deep geological repository for nuclear waste, i.e. phase 3 of the so-called Sectoral Plan. While the choice of geological siting areas had been narrowed down to three regions (Zürich Nordost, Nördlich Lägern, and Jura Ost) in phase 2 already, these sites need now to be examined in-depth, with site-specific geological knowledge corroborated by means of geological investigations where necessary. Start of operation of the repositories is not expected any time before 2050 (for low- and intermediate-level waste (LMLW)), respectively 2060 (for high-level waste (HLW)).

From this brief review of the current situation, it is evident that nuclear know-how in plant operation and safety, plant decommissioning, and waste treatment will still be needed for several decades. However, with the anticipated nuclear phase-out in sight, it becomes increasingly difficult to recruit, motivate and maintain a qualified domestic work force, and to educate and train the next generation of nuclear engineers. However, the long-term preservation of nuclear competence is a necessary prerequisite to foster the nuclear safety culture, which Switzerland has so successfully implemented, and is therefore a major challenge that nuclear industry, regulator, and research institutions are facing. We will argue that, due to the interdisciplinarity and complexity of nuclear safety assessment and aging phenomena, nuclear competence is best preserved through deep involvement in research activities at the forefront of engineering sciences, and with the support of world-class scientific infrastructure.

In what follows, we will shed a light on the “Grand Challenges” that emerge from the situation described above, and the most pertinent R&D resulting priorities. These include, amongst others, the understanding of radiation damage to reactor materials and components, an improved probabilistic and deterministic safety

assessment taking into account all sources of uncertainties, and the different stages of nuclear waste management. We will also outline the importance of international networks in the nuclear safety and security regime, and the political relevance of Switzerland having a strong voice in those due to its state-of-the-art research, body of regulations, and outstanding nuclear safety culture.

2. Research & Development priorities

As already outlined in the preamble, Switzerland faces several technological and research challenges regarding the phase-out of nuclear energy. In what follows, we shall briefly outline the most pertinent questions to be answered.

Long-term operation and ageing management of NPP: while most NPP were originally designed for 40 years lifetime with very large built-in conservatism, it is generally accepted today that there is sufficient margin to go far beyond that. However, this needs to be supported by strong experimental and analytical evidence, since no power plant worldwide has actually reached this age. This includes the investigation of the behavior of nuclear materials and components under adverse conditions (high temperature and pressure, corrosion and high radiation fields), in particular the embrittlement of the reactor pressure vessel due to neutron irradiation damage. Ageing mechanisms will inevitably influence the safety performance of the plant, and it needs to be demonstrated that the NPP is still fit to withstand a set of design basis accidents with sufficient safety margin. The Fukushima accident has also necessitated a wide range of retrofitting measures of safety systems, as well as a revision of the accident management procedures for the Swiss plants.

Extended operation modes of NPP: although many recent Pressurized and Boiling Water Reactors (PWR/BWR) allow by design load-follow and frequency stabilization operation, Swiss power plants are currently operated in baseload operation. With an increasing amount of volatile, renewable energy sources feeding into the grid, the necessity might emerge to make NPP operating modes more flexible, and allow for more load changes with steeper gradients. This process has been established in neighboring countries with good success, but nevertheless requires an extension of the licensing regime and additional safety assessment.

Decommissioning and Dismantling of Nuclear Power Plants: in principle, the decommissioning of an NPP is a well-understood process, although only a very limited number of NPP worldwide has been completely dismantled and disposed, and often with significantly higher costs than originally projected. The challenge of the dismantling process rests mostly with the disassembling techniques for radioactive steel components and concrete structures, the decontamination and conditioning of the emerging low- and medium level waste, and the licensing/oversight procedures. Large optimization potential lies in advanced measurement and computational methods for the clearance of radioactive waste (with the new Swiss ordinance for radiation protection, the clearance level for many nuclides have been substantially reduced). In order to minimize the amount of waste in the deep geological disposal, an optimum balance between medium-term decay storage, appropriate decontamination techniques, and clearance as conventional waste has to be found. Advanced computational techniques allow today to perform very detailed a-priori estimates of the amount of activated material to be expected during decommissioning. Socio-economical and safety aspects play likewise an important role for gaining public acceptance of the decommissioning process.

Long-term Intermediate Storage of Spent Fuel Assemblies: with the earliest deposition of spent fuel assemblies in the final waste disposal not taking place before 2060, the spent fuel assemblies in Switzerland will potentially need to be stored 80 to 100 years at Switzerland's centralized intermediate storage facilities at ZWILAG (intermediate storage facility at Würenlingen), and KKB (Beznau nuclear power plant). The issue of long-term dry storage of fuel rods has only been insufficiently investigated, and limited knowledge exists on the potential damage mechanisms that may impede fuel integrity. This will become relevant once the storage casks are being transported from ZWILAG to the surface facility of the deep geological repository,

where they will be opened, and the fuel assemblies being unloaded and re-loaded into dedicated waste containers. A breach in the fuel cladding tubes may lead to the hazardous release of radioactivity in the surface facility and severely thwart its operation.

Final Disposal of Nuclear Waste: independent of the role of nuclear energy in the Swiss energy mix, the issue of a safe disposal of radioactive waste has to be further advanced towards full implementation of a final repository. With entering into phase 3 of the Sectoral Plan (“Sachplan Geologische Tiefenlager”), a definite site for a deep geological disposal shall be found by the end of the next decade. This will necessitate scientific infrastructure to accompany the geological investigations, as well as sophisticated computer modelling techniques to understand the complex geochemical processes in the host rock formations. Furthermore, it requires a good understanding of the long-term processes that have the potential to impede the safety performance of a disposal site. And finally, involvement of the public and a transparent conduction of the entire siting process are crucial to finding a widely accepted solution.

Technology Monitoring and Participation in International Rules and Guidelines Building: In the actual Federal Energy Research Master plan (2017-2020) it has been clearly stated that Switzerland is to play its part in the development of technologies for safe and more efficient reactors, including advanced reactors (non-Light Water Technology) and nuclear fusion, to the extent that it remains able to make its own expert judgements of nuclear technologies emerging elsewhere. Consequently, new Generation IV reactor technologies should be continuously evaluated from the point of view of nuclear safety and sustainability (in the latter case in particular with regards to reduction of nuclear waste). Moreover, an active national research, regulations and education program enables Switzerland to actively participate and represent its national interests in the building of international rules and guidelines in the nuclear safety and security regime. A continued membership in supranational organizations like the OECD Nuclear Energy Agency (NEA) and the International Atomic Energy Agency (IAEA) is therefore mandatory to maintain a strong voice on the international stage. **Participation to EURATOM and the OECD/NEA** research projects is mandatory for Swiss nuclear community for insuring further direct influence on the nuclear research directions and priorities pursued by the neighboring countries and ensure that the development of new knowledge and competences also serve the long term societal, environmental and economic interests of Switzerland. It is also a vital sign to the European Commission and European partners that Switzerland is committed to the further improvement of nuclear safety. Participation in EURATOM and OECD/NEA research projects also helps Switzerland to maintain and keep up to date critical large infrastructures like the Hot Laboratory in PSI.

Cross-Cutting Technologies in the Nuclear Domain: nuclear research in Switzerland is not only focused on the peaceful use of fission technologies for electricity production, but includes also further development of nuclear techniques for example in the context of radiation protection and the medical and industrial applications of radiation. This addresses, inter alia, the secure and safe supply and use of radioisotopes. Another critical field for Switzerland is the further research and development of fusion technology that is centralized on a European scale by EURATOM; fusion and fission feature a wide technical overlap, especially with respect to materials research.

The Paul Scherrer Institute as Switzerland’s Nuclear Center of Excellence: The Nuclear Energy and Safety Division (NES) of the Paul Scherrer Institut (PSI) is the center for nuclear fission research in Switzerland, its key mission being the preservation of nuclear knowledge for the foreseeable future. As of May 2019, the division comprises of 210 scientific, technical, and administrative staff, of which around 120 are scientists with permanent working contracts, thus guaranteeing long-term maintenance of nuclear competences at PSI. The PSI hot laboratory, a key nuclear infrastructure and one of the few hot laboratories in Europe has just received the approval from the Swiss Nuclear Regulator (ENSI) for extended operation until 2026 and beyond. PSI provides scientific support to ENSI, and thus acts as a Technical Safety Organization (TSO), with direct involvement in licensing and oversight processes. Together with EPFL and ETH Zürich, PSI hosts the Swiss

Nuclear Engineering master program from which each year 10-15 graduates enter the Swiss nuclear job market.

3. Conclusion

This paper has been composed to **create awareness for the rather pressing issue of preservation of nuclear competence**, by elaboration of the most relevant R&D priorities which are rather independent of the nuclear phase-out decision and will remain pertinent for several decades. During the transition phase of the E2050, nuclear power plants will continue to provide a significant amount of the Swiss electricity consumption. While Switzerland still owns a fairly stable nuclear workforce in industry, research, and regulation, and possesses world-class nuclear facilities (e.g. the “Hot Laboratory” and several large thermal-hydraulics test rigs at PSI, as well as the research reactor CROCUS at Lausanne), education in nuclear core topics is restricted to one rather small programs at ETH Zurich, EPFL, and PSI. Programs that address the socio-economic implications of nuclear power, human factor or risk studies, are extremely scarce and only fragments can be found at some Universities of Applied Sciences. The training for operating staff of NPP takes place only at the Paul Scherrer Institut (PSI). There is a legitimate concern that these education platforms may become insufficient in the near future.

We aim therefore at proposing the creation of a network respectively competence center for nuclear education, competence preservation, and legacy management with PSI as leading house, that shall combine all institutions in Switzerland that have stakes in these areas, and that shall bundle the national research and education activities **in order to guarantee a nuclear phase-out under the highest safety precautions** until the last day of operation of Swiss NPP and beyond, as well as a further participation of Switzerland to the international effort for the **improvement and benefit of nuclear safety worldwide**.

Anhang 4

Participation suisse aux recherches internationales dans le domaine nucléaire

Staatssekretariat für Bildung, Forschung und
Innovation SBFJ

Abteilung Forschung und Innovation

Participation suisse aux recherches internationales dans le domaine nucléaire

La recherche européenne dans le domaine nucléaire a pour cadre institutionnel la Communauté européenne de l'énergie atomique, aussi nommée « Euratom ». Euratom conduit un programme de recherche et de formation finançant des activités dans les domaines de la fusion et de la fission nucléaire et finançant les activités nucléaires du Centre commun de recherche (CCR ou Joint Research Centre). Le traité Euratom est également le fondement institutionnel de l'entreprise européenne commune pour ITER et pour le développement de la fusion, « Fusion for Energy ». Celle-ci livre la contribution de l'Europe à la construction du réacteur thermonucléaire expérimental ITER par l'UE, la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Japon, la Russie et les Etats-Unis.

La Suisse participe depuis 1978 au programme de recherche d'Euratom en fusion nucléaire. Dès 2004, **la Suisse est associée à l'ensemble des programmes-cadres de recherche de l'UE, au programme de recherche d'Euratom** et sa participation aux recherches européennes en fusion nucléaire est intégrée dans ce cadre général. **La Suisse participe indirectement à la construction d'ITER à travers l'entreprise commune européenne pour ITER** (Fusion for Energy) dont elle est membre depuis son établissement en 2007.

Les participations de la Suisse aux activités internationales de recherche conduites dans le cadre de l'AIEA ainsi que d'agences de l'OCDE (IEA, NEA) complète cette vue d'ensemble. Elles ne sont pas traitées en détail dans cette annexe.

1. Domaines de recherche concernés (fusion/fission)

1.1 Fusion nucléaire

L'enjeu principal des recherches en fusion nucléaire est le développement des technologies nécessaires à l'exploitation de cette réaction en tant que source d'énergie virtuellement illimitée ne générant ni CO₂ ni déchets radioactifs dangereux à long terme. Les réacteurs à fusion du futur seront intrinsèquement sûrs et l'énergie produite pourrait être utilisée à des fins multiples, notamment pour la production d'électricité et d'hydrogène. Environ 100 ans après le déclassement, tous les éléments de la centrale devraient être non radioactifs et entièrement démontables. **Il est attendu que la fusion nucléaire complète les énergies renouvelables et apporte dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle une réponse durable aux besoins énergétiques d'une société écologiquement responsable et au bilan carbone neutre.**

La réalisation d'ITER doit démontrer l'intérêt de la fusion nucléaire comme source d'énergie propre et sûre

Au niveau global, **la recherche en fusion nucléaire est focalisée sur la construction du réacteur thermonucléaire international ITER à Cadarache**, en France. La réalisation de cette installation hors-normes a pour objectif de démontrer l'intérêt de la fusion nucléaire pour la production d'énergie à échelle industrielle et ouvrir la voie à la construction d'un réacteur de démonstration connecté au réseau électrique. ITER devrait produire 500 MW de puissance de fusion à partir de 50 MW de puissance thermique injectée dans le réacteur pour initier la réaction. La chaleur ainsi générée permettra d'entretenir la réaction. Enfin, ITER testera la production de tritium à l'intérieur du réacteur. Initiée en 2007, la construction d'ITER a atteint à la fin 2019 un niveau d'exécution de 67%. Les travaux de génie civil les plus importants sont désormais terminés et la phase d'assemblage des composants a débuté en avril 2020. Il est prévu que

le tokamak, le réacteur confinant le plasma, entre en service dès 2025 et que les expériences nucléaires décisives interviennent vers 2035.

Au niveau européen, Fusion for Energy concentre les activités de recherche et développement directement liées à la construction d'ITER.

Les institutions de recherche apportent une contribution substantielle au développement de la fusion nucléaire dans le cadre du programme Euratom

Exécuté par les institutions de recherche membres du consortium EUROfusion, le programme de recherche d'Euratom complète les activités de Fusion for Energy. Ces activités couvrent les huit missions définies dans la Feuille de route européenne pour l'énergie de fusion¹ :

- physique des plasmas et simulations numériques
- systèmes d'évacuation de la chaleur
- matériaux résistants aux neutrons
- autosuffisance en tritium
- conception des systèmes intrinsèquement sûrs
- préconception d'un réacteur de démonstration (DEMO)
- compétitivité économique de l'électricité de fusion
- éducation et formation

Soutenant activement la réalisation d'ITER, le programme exploite de nombreuses installations existantes, notamment le tokamak européen JET (Culham, UK) et trois tokamaks nationaux de taille moyenne.

La Suisse contribue très activement au développement de l'énergie de fusion

L'EPFL est le membre suisse d'EUROfusion, via son **Swiss Plasma Center (SPC)** réparti entre les sites de l'EPFL (Lausanne) et du PSI (Villigen). Le Directeur du SPC exerce la Présidence de l'Assemblée Générale d'EUROfusion depuis 2019. Le SPC héberge sur son site de Lausanne l'un des trois tokamaks sélectionnés par EUROfusion pour l'exécution du programme d'Euratom. Sur son site de Villigen, il exploite également SULTAN, la seule machine au monde capable de tester et qualifier les éléments supraconducteurs qui seront installés sur ITER. **Différentes entreprises suisses sont également impliquées dans la réalisation d'ITER**, livrant par exemple des équipements de cryogénie, des valves absolues, ou encore des alimentations électriques de pointe.

1.2 Fission nucléaire

Les programmes de recherche en fission nucléaire d'Euratom se concentrent sur la sûreté des installations et sur la gestion des déchets

Une part importante de la recherche au sein d'Euratom porte sur la **sécurité des systèmes actuels et futurs**. Est ici aussi incluse la 4^{ème} génération d'installations, qui devraient être plus sûres, plus propres et plus efficaces. En principe, une partie des déchets problématiques actuels pourraient y être « rebrûlés », grâce à la « transmutation ». A l'heure actuelle, il s'agit là encore de recherche fondamentale et en l'état actuel des connaissances, il restera nécessaire d'entreposer certains déchets. C'est pourquoi le Programme fission investit aussi beaucoup dans la recherche sur la **gestion des déchets**.

Le sous-programme dédié à la **radioprotection** se distingue dans la mesure où il n'est pas dédié spécifiquement à l'exploitation énergétique du nucléaire. Il couvre par exemple également les sources de radiation pour la **médecine** ou la définition de normes pour l'utilisation du nucléaire en général.

¹ [European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy](#)

Enfin, le programme de recherche d'Euratom accorde une importance particulière à la **formation de la relève** dans le domaine des technologies nucléaires. Il s'agit ici de soutenir la formation des futures générations de chercheurs et d'ingénieurs dans le domaine nucléaire de façon à ce que l'Europe dispose de suffisamment de spécialistes qualifiés.

1.3 Le Centre commun de recherche de l'UE contribue aux recherches nucléaires

Le Centre commun de recherche (CCR, Joint Research Centre JRC en anglais) est le laboratoire de recherche scientifique et technique de l'UE. En tant que service scientifique de la CE, il joue le rôle de centre de référence en matière de science et de technologie et conduit – à côté de ses autres tâches – d'importantes activités de recherche dans le domaine nucléaire qui ne peuvent pas être menées par un état seul ou qui demandent d'être effectuées par une instance officielle. Un exemple concret est la production de radio-isotopes pour l'étalonnage des appareils de mesure de la radioactivité ou pour la médecine nucléaire. Les travaux menés dans le cadre du CCR traitent aussi de sujets tels que la gestion des déchets radioactifs et ses effets sur l'environnement, la sécurité technique du nucléaire et les activités de surveillance. La Suisse peut prendre part aux activités du CCR par le biais de coopérations entre des institutions suisses et le CCR, par l'utilisation des produits et services du CCR et – depuis 2019 – par l'accès direct aux infrastructures de recherche du CCR.

2. Aspects quantitatifs

La recherche nucléaire représente 5.5% du budget du Programme Horizon 2020. La contribution à la construction d'ITER étant, avec 3.6%, le poste le plus important, suivi par la partie fusion d'Euratom avec 0.9%, le CCR avec 0.7% et enfin le volet fission et radioprotection avec 0.4% du budget total (Tableau 1).

Tableau 1: Gesamtbudget des 8. Europäischen Forschungsrahmenprogramms (Horizon 2020) und Anteile für die Nuklearforschung (Mio. EUR)

Recherches européennes	Budget (MEUR)	%
Horizon 2020 (tous domaines confondus)	81'546	100
dont Recherches nucléaires	4'519	5.5
dont ITER	2'915	3.6
dont Programme Euratom en fusion	728	0.9
dont Activités nucléaires du CCR	560	0.7
dont Programme Euratom en fission et radioprotection	316	0.4

L'excellence de la recherche helvétique a permis à ses institutions de lever entre 2014 et 2019 45.7 millions de francs dans le cadre du programme Euratom.

Dans le domaine de la fission, 41 participations dans 28 projets ont permis de lever 13.7 millions de francs, principalement à travers l'Institut Paul Scherrer (PSI), l'EPFL et la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) (Tableau 2). La recherche suisse y est axée essentiellement sur la gestion des déchets et la sécurité des systèmes actuels et futurs (78% des participations). Une ventilation du budget plus détaillée afin, par exemple, de distinguer les montants dévolus à la recherche sur les nouveaux réacteurs nucléaires de ceux dévolus à la sécurité des systèmes n'est pas fournie par la Commission Européenne. Cependant, une estimation basée sur une évaluation d'experts indique qu'environ 2.7 millions de francs ont été versés en faveur de participants suisse à des projets de recherche principalement axés sur le développement de nouveaux réacteurs (Génération IV) dans la période 2014 à 2019, soit 20% des fonds levés pour la recherche

suisse en fission dans le cadre d'Euratom ou 6% des fonds levés au total (fusion et fission confondus). Dans le domaine de la fusion, les institutions suisses ont levé 32.0 millions d'euros sur la même période.

Dans le même temps, la Suisse a versé 80.7 millions de francs pour sa participation au programme Euratom. Ce dernier montant inclut des contributions pour les activités nucléaires du CCR et pour l'exploitation du réacteur JET qui, tous deux, ne génèrent par définition aucun retour financier.

Pour la **construction d'ITER**, la Suisse a versé sur la période 2007-2019 259.9 millions de francs. Sur la même période, il est estimé que **les institutions suisses de recherche et entreprises ont bénéficié de contrats industriels en relation avec ITER pour un montant total d'environ 190.4 millions de francs**. Le coefficient de retour financier de la Suisse pour le projet ITER s'établit donc pour l'heure à 0.73, un chiffre appréciable pour la participation à la construction d'une infrastructure de recherche qui n'est pas sise sur territoire helvétique.

Tableau 2 : Répartition des recherches au sein du Programme de recherche d'Euratom en fission nucléaire et participations suisses par domaines thématiques.

Forschungsbereiche	Anzahl CH Beteiligungen	%	Verpflichtet Beiträge für CH Beteiligungen (Mio CHF)	%	Anzahl CH Beteiligung Gen IV Forschung (Schätzung) ¹	%	Beiträge für CH Beteiligungen Gen IV Forschung (Mio CHF) ¹	%
Atommüll	13	32	3.4	25	1	2	0.3	2
Sicherheit der nuklearen Systeme	12	29	4.3	31	4	10	1.5	11
Fission Kompetenzen	7	17	3.7	27	1	2	0.3	2
Forschungsinfrastrukturen	4	10	1.4	10	2	5	0.8	6
Strahlenschutz	3	7	0.7	5	0	0	0.0	0
Werkstoffe und Konzepte	2	5	0.3	2	0	0	0.0	0
Total	41	100	13.7	100	8	20	2.7	20

¹Estimation basée sur une évaluation d'expert des projets avec une participation suisse.

3. Importance de la participation de la Suisse aux recherches nucléaires internationales

La participation de la Suisse aux instruments internationaux de recherche dans le domaine nucléaire permet **de développer et conserver en Suisse une expertise et des compétences de pointe** requises à moyen et long terme tant pour gérer l'héritage de de l'industrie nucléaire actuelle que pour se réserver la possibilité d'exploiter toute nouvelle opportunité **d'accélérer la transition énergétique et la décarbonation de l'économie**.

Des compétences de haut niveau seront en effet requises tout au long des prochaines décennies afin d'assurer l'**exploitation** et le **démantèlement** des centrales de puissance existantes. La **gestion des déchets** nucléaires à long terme impose elle aussi de disposer en tout temps de personnel spécialisé dont les compétences s'appuient sur les travaux de recherche académiques les plus récents. A cet égard, les recherches en fission nucléaire menées dans le cadre du programme Euratom convergent pleinement avec les intérêts suisses.

La Loi sur l'énergie nucléaire impose par ailleurs au Conseil fédéral de faire régulièrement rapport à l'Assemblée fédérale sur le développement de la technologie nucléaire (art. 74a LENU). Il est à ce titre nécessaire pour l'administration fédérale de **suivre et de conserver la capacité d'évaluer de manière autonome les développements les plus récents en**

matière de technologie nucléaire. Sont ici concernés en premier lieu le développement des technologies nécessaires à l'exploitation industrielle de la fusion nucléaire, mais aussi les recherches dédiées à la fermeture du cycle du combustible en fission nucléaire ou encore le retraitement des déchets existants par transmutation.

Or, cette **exigence d'autonomie** repose sur le maintien en Suisse de **filières académiques** dont l'excellence dépend de leur insertion dans les réseaux internationaux de recherche, Euratom en premier lieu. La participation à ces recherches doit aussi permettre aux **entreprises suisses** de s'insérer efficacement dans les filières industrielles qui naîtraient de nouveaux développements technologiques.

Il faut enfin souligner que les recherches dans le domaine nucléaire, qu'elle soient conduites ou non dans le cadre de collaborations internationales, donnent lieu à de **nombreuses applications non-énergétiques**. Parmi les domaines concernés comptent la médecine nucléaire avec l'usage de rayonnements ionisants en oncologie et d'isotopes radioactifs en imagerie, les processus de stérilisation ou encore le filtrage des émissions de soufre.

Ces considérations ont été aussi relevées en automne 2018 par le Conseil des EPF, lorsque, donnant suite à une consultation du DEFR, il a approuvé une prise de position fermement en faveur de la poursuite de la Suisse au programme de recherche d'Euratom et aux activités de Fusion for Energy (ITER).

Anhang 5

Les réacteurs au thorium sont le futur de l'énergie durable

Prof. Maurice Bourquin, Yves Depeursinge et Jean-Christophe de Mestral

Université de Genève

Les réacteurs au thorium sont le futur de l'énergie durable

Rapport sur l'évolution technologique et sur la
thématique des déchets radioactifs quant à la
4ème génération de réacteurs nucléaires

Maurice Bourquin, Yves Depeursinge et Jean-Christophe de Mestral

8/25/2019

Sur mandat du Secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation.

Introduction

Les informations fournies dans ce rapport doivent contribuer à assurer la sécurité d'approvisionnement en énergie de la Suisse, en respectant au mieux les recommandations des conférences annuelles de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP), ainsi qu'à répondre à l'article 74a de la loi sur l'énergie nucléaire : « Le Conseil fédéral fait régulièrement rapport à l'Assemblée fédérale sur le développement de la technologie nucléaire ». Nous estimons en effet de notre devoir, en tant que scientifiques non liés au marché de l'énergie, d'informer la société des nouvelles possibilités offertes par la recherche scientifique et technologique dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Contexte énergétique et environnemental

Selon un rapport récent du World Economic Forum (1), le monde doit fournir un accès à l'énergie à plus d'un milliard de personnes qui en manquent et, d'ici 2050, répondre à la demande de deux milliards de personnes supplémentaires, tout en diminuant les émissions de gaz à effet de serre et en maintenant des coûts abordables. Ce défi lie le besoin de « décarboniser » la production d'énergie à celui de maintenir à un haut niveau d'accès et de sécurité aux différentes filières énergétiques. Dans les pays de l'OCDE en particulier, la production d'électricité est responsable actuellement de 40% des émissions de gaz à effet de serre ; elles devront baisser de 85%.

Réussir cette transition énergétique demande le développement et la mise en application de nouvelles technologies innovantes. En particulier, ces technologies ne doivent pas émettre de pollutions atmosphériques ni de gaz à effet de serre et participer à une certaine indépendance énergétique des pays. Il ne s'agit pas seulement de répondre aux demandes actuelles, mais aussi d'anticiper les besoins de demain. Concrètement, il faudrait investir rapidement dans des technologies dont le potentiel permettra d'intéresser des jeunes ingénieurs, scientifiques et managers, d'attirer des investissements adéquats, de convaincre l'opinion publique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'ordre d'une gigatonne de CO₂ par an.

En ce qui concerne l'énergie d'origine nucléaire, il y a actuellement quelques 450 centrales nucléaires commerciales en fonctionnement dans le monde, qui fournissent une part significative de l'électricité consommée (10.4% en 2016 (2), et 15% à 20% en Europe en 2050 d'après la Commission Européenne). En 2018, 53 nouvelles centrales étaient en construction (3) et 154 en développement (4). Contrairement aux centrales utilisant du combustible d'origine fossile (lignite, charbon, pétrole ou gaz), les centrales nucléaires n'émettent pas plus de gaz à effet de serre par kWh produit que les centrales hydroélectriques. Elles ne polluent pas non plus l'atmosphère par émission de particules fines.

Cependant, il est peu probable que les filières nucléaires actuelles se développent de façon durable, en raison des réserves de combustible uranium-235 limitées et de la résistance d'une part du public face aux risques que pose la sécurité des centrales et des déchets radioactifs. Les désavantages de la production d'électricité par des centrales nucléaires classiques (principalement de la génération II) ont amené à l'évaluation de nouvelles technologies, en particulier au sein des programmes de développement de nouvelles générations dites de génération IV.

Positionnement sur le nucléaire du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) et de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)

Dans son dernier rapport (5), le GIEC **met en exergue le rôle que doit jouer l'énergie nucléaire** dans les quatre scénarios envisagés (6). Entre 2010, point de référence, et 2050, le GIEC estime que la puissance disponible d'origine nucléaire doit augmenter dans une fourchette qui va de 150 % (scénario P1, dans lequel la demande en énergie est globalement réduite) à 468 % (scénario P4). C'est plus de cinq fois la production actuelle. Le scénario P4 demande des ressources énergétiques

« décarbonées » importantes, puisque la demande est supposée suivre l'activité économique globale et que les ressources énergétiques nécessaires à la mise en œuvre des techniques de capture et stockage du carbone (CCS) sont importantes.

Quel que soit le scénario envisagé, **le nucléaire est donc appelé à contribuer de manière importante à la poursuite des objectifs des COP successives et du GIEC** en matière de production d'énergie. Cependant cela ne sera possible qu'à la condition de remplir un cahier des charges strict et acceptable en matière de sécurité et de gestion des déchets nucléaires, notamment.

Par ailleurs, **l'Agence Internationale de l'Energie**, qui regroupe 30 pays dont la Suisse, a publié un rapport daté du 28 mai 2019 (7) qui mentionne, dans sa présentation, que « **l'énergie nucléaire et l'hydroélectricité constituent l'épine dorsale de la production d'électricité à faible émission de carbone**. Ensemble, ils assurent les trois quarts de la production mondiale à faible émission de carbone. Au cours des 50 dernières années, l'utilisation de l'énergie nucléaire a permis de réduire les émissions de dioxyde de carbone CO₂ de plus de 60 gigatonnes, soit près de deux ans d'émissions mondiales liées à l'énergie. Cependant, dans les économies avancées, l'énergie nucléaire a commencé à s'estomper, avec la fermeture d'usines et peu de nouveaux investissements, au moment même où le monde a besoin de plus d'électricité à faible émission de carbone.

(...) Réaliser le rythme de réduction des émissions de CO₂ conformément à l'accord de Paris est déjà un défi de taille, comme le montre le scénario de développement durable. Elle exige de fortes augmentations de l'efficacité énergétique et des investissements dans les énergies renouvelables, ainsi qu'une augmentation de l'énergie nucléaire. Le présent rapport identifie les défis encore plus grands que pose le fait de tenter de suivre cette voie avec beaucoup moins d'énergie nucléaire. Il recommande plusieurs mesures gouvernementales possibles visant à faire en sorte que les centrales nucléaires existantes puissent fonctionner tant qu'elles sont sûres, à appuyer les nouvelles constructions nucléaires et à encourager le développement de nouvelles technologies nucléaires. »

Contexte énergétique suisse

En 2017 en Suisse, la consommation d'électricité se montait à 24,8% de la consommation globale d'énergie (8). Avec 25%, elle a été en légère augmentation en 2018 (chiffres non-définitifs). Parmi les sources renouvelables d'électricité, on compte généralement les centrales hydrauliques, les centrales thermiques à carburant renouvelable (les déchets urbains ou bois, par exemple), les panneaux photovoltaïques, les éoliennes et les générateurs au biogaz.

En 2017, les centrales hydrauliques ont représenté 59,6% (en 2018 : 55,4%) de la production nationale, les centrales thermiques à carburant renouvelable, 1,9% (2018 : 1,7%), les panneaux photovoltaïques, 2,7% (2018 : 2,9%), l'éolien, 0,2% (2018 : idem) et enfin, le biogaz, 0,5% (2018 : idem). Le solde de la production électrique vient principalement des centrales nucléaires, soit 31,7% en 2017 (2018 : 36,1%). Les importations nettes de l'étranger (les importations moins les exportations) s'élevaient à 9% en 2017 (2018 : -2,3%). Les exportations étaient supérieures aux importations en 2018, suite au redémarrage de deux réacteurs après une période d'entretien.

A ce jour, on doit constater qu'en dehors des centrales hydrauliques, la production d'électricité par des sources renouvelables reste relativement marginale : 5,3% en 2017 et 2018. Par ailleurs, certaines de ces sources sont très variables en fonction des saisons et de la météorologie. C'est notamment le cas pour les panneaux photovoltaïques et les éoliennes.

Le remplacement des centrales nucléaires par des sources renouvelables, bien que souhaité, n'est pas évident, même si certains groupes d'intérêt le voient non-seulement comme prioritaire, mais également comme réalisable à un horizon relativement proche. Ainsi, selon Swissolar (9), « pour remplacer l'énergie nucléaire et les énergies fossiles, la puissance installée annuelle des systèmes photovoltaïques doit être au moins quintuplée », objectif loin d'être aisé à atteindre. De plus, une

gamme de coûts de production relativement bas demanderait une augmentation significative des réseaux et moyens de stockage.

Dans les années qui viennent, l'investissement dans l'efficacité énergétique (par exemple l'isolation des bâtiments, la géothermie, l'optimisation de la production industrielle, etc.) est bien évidemment de grande importance et doit être favorisé. Toutefois, on ne saurait prétendre que multiplier par pratiquement un facteur dix la part de la production par des sources renouvelables pourra se faire simplement, sans compter la dimension variable de cette production.

Dans ce contexte, le principe de précaution devrait nous inciter à étudier sérieusement des solutions alternatives pouvant répondre aux besoins, notamment en périodes creuses pour les sources renouvelables. Sans compter que la consommation électrique a de fortes chances de s'accroître à l'avenir : en effet notamment la tendance à remplacer les véhicules à moteur thermique par des véhicules électriques entraînera certainement une relativement forte demande en énergie électrique, malgré le rendement nettement supérieur de ces derniers (au moins de l'ordre de 10 à 20% d'énergie électrique supplémentaire). Rappelons simplement que la part des carburants pour véhicules motorisés dans la consommation énergétique globale est de l'ordre de 25,2%, ce qui correspond environ à la part totale d'électricité consommée en Suisse.

Le présent rapport s'inscrit dans ce contexte. Il vise à proposer des pistes qui répondent à cet objectif tout en garantissant sécurité, fiabilité et durabilité sur le plan des approvisionnements et des conséquences (notamment l'élimination des déchets). Cette nouvelle approche inclut, en plus de la production d'électricité, de nouvelles opportunités pour la production d'hydrogène, une source d'énergie alternative pour la mobilité, la production de radio-isotopes pour la médecine et l'industrie, ainsi que la mise à disposition de sources d'irradiations neutroniques de haute intensité. Nous retenons pour la suite de cette discussion essentiellement les systèmes proposés dans le cadre international du GIF (Generation IV International Forum), dont la Suisse est membre, et compatibles avec l'utilisation du **combustible thorium**. En particulier nous incluons les **réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateurs de particules**, tenant compte de leurs avantages essentiels et des compétences présentes en Suisse, tant à l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), qu'à l'Institut Paul Scherrer (PSI) ou dans les hautes écoles universitaires.

En Suisse, cinq réacteurs en fonctionnement fournissent environ 40% de la demande en électricité (10) et, ce qui est particulièrement important, des besoins en capacité. Ils sont actuellement essentiels à l'approvisionnement et à l'indépendance énergétique du pays. Or, suite à l'approbation des premières mesures de la Stratégie énergétique 2050, la loi interdit la construction de nouvelles centrales nucléaires. Ainsi, la production d'énergie d'origine nucléaire en Suisse va cesser d'ici une vingtaine d'années environ, suivant un calendrier encore indéfini. Néanmoins, pendant cette période, il est essentiel que la Suisse maintienne le plus haut niveau de sécurité nucléaire pour le fonctionnement de ses centrales et gère les déchets produits suivant les plus hauts standards, malgré la complexité technique et procédurale. Il ne fait pas de doute que la compétence nécessaire est la mieux préservée par **la participation à des projets scientifiques internationaux et au maintien d'infrastructures de recherches performantes**. Ceux-ci incombent aux Hautes écoles suisses et à l'Institut Paul Scherrer. En particulier, la participation de la Suisse aux programmes d'Euratom, de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE et de l'Agence internationale de l'énergie atomique peut être considérée comme un élément efficace. Un document décrivant une série d'actions à poursuivre et d'infrastructures correspondantes nécessaires a été rédigé récemment par le Prof. Andreas Pautz de l'EPFL et du PSI. Ses conclusions figurent à l'Annexe 1.

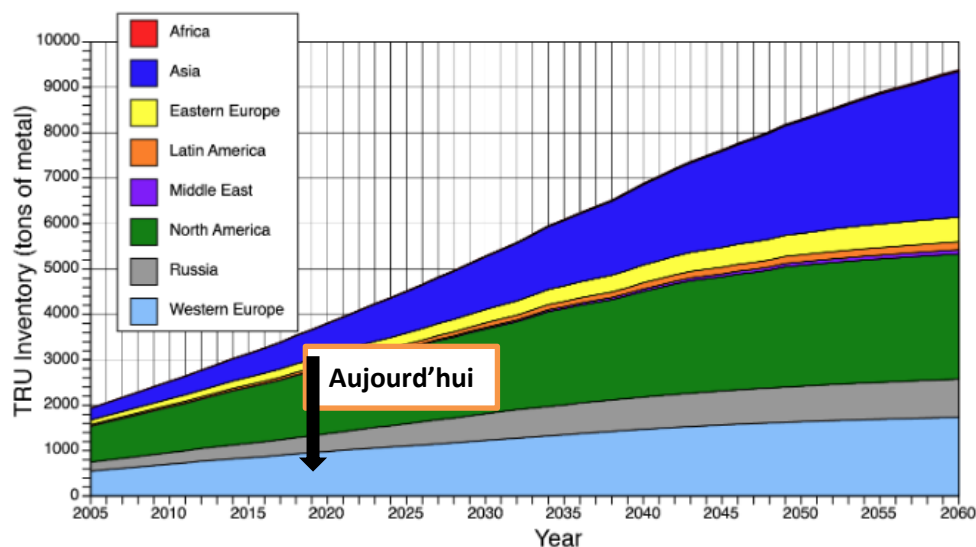
Un problème central : les déchets radioactifs des réacteurs nucléaires

Les réacteurs nucléaires des générations actuelles fonctionnent avec du combustible constitué d'uranium-238 (non fissile) enrichi de 3% à 20% d'isotope fissile uranium-235, c'est-à-dire pouvant donner lieu à des réactions nucléaires de fission. L'isotope uranium-235 est relativement rare, puisqu'il constitue seulement 0,72 % de la masse de l'uranium naturel. L'utilisation du combustible

uranium s'accompagne d'un certain nombre de difficultés : le problème des déchets radioactifs de longues durées de vie, la complexité de la sécurité des réacteurs, les risques liés à la prolifération des armes nucléaires, le coût élevé des investissements initiaux, les ressources limitées dans le temps en uranium.

Pour illustrer le problème des déchets, on peut citer l'Office fédéral de l'énergie : « Des déchets radioactifs sont produits chaque jour en Suisse. Ils proviennent principalement de la production d'électricité des cinq centrales nucléaires, mais aussi de la médecine, de l'industrie et de la recherche. On distingue les déchets hautement radioactifs (DHR) et les déchets faiblement ou moyennement radioactifs (DFMR). Ensemble, ils représentent un volume de quelque 100'000 mètres cubes, dont près de 90 % de DFMR. La majeure partie des DFMR sont engendrés lors du démantèlement des centrales nucléaires. Selon la catégorie dont ils font partie, une fraction de ces déchets doit être stockée un million d'années jusqu'à ce qu'elle ne représente plus de danger pour l'être humain et pour l'environnement. Les déchets radioactifs sont actuellement entreposés en surface dans des halles bien sécurisées à proximité des centrales nucléaires et dans deux dépôts intermédiaires situés dans le canton d'Argovie. »

L'enfouissement des déchets nucléaires DFMR dans des dépôts en couches géologiques profondes ne présente pas de problèmes techniques insurmontables. Par contre, la durée de stockage des DHR, estimée à environ 1 million d'années, suscite bien des interrogations. En 2060, ces déchets hautement radioactifs vont représenter dans le monde entier environ 9000 tonnes (dont environ 36 tonnes en Suisse pour un volume de 9000 m³), si l'on considère tous les réacteurs existants et en construction.



Ces courbes montrent l'évolution de la quantité de déchets radioactifs de très longue durée de vie (100'000 ans et davantage) qui sont produits dans le monde (en tonnes) par les centrales nucléaires à uranium. (Nuclear-21.Net/NuInfo).

Par ailleurs, les récents événements politiques semblent confirmer la nécessité de trouver, dans des délais raisonnables, une issue au problème de la prise en compte des déchets nucléaires existants. Il faut rappeler que, le 10 juin 2018, le Canton de Nidwald a refusé leur enfouissement sur son territoire. Cette problématique deviendra de plus en plus critique à l'avenir, et les conditions politiques tendent à monter que les solutions classiques pourraient bien représenter une impasse. La réaction de la population de Nidwald paraît symptomatique du rejet généralisé des citoyens de notre pays face à cette question, d'autant qu'à Nidwald il ne s'agissait pas d'enfouir les déchets les plus nocifs. Cela laisse entendre que les autorités politiques devront, dans des délais relativement rapprochés, trouver de nouvelles réponses à la problématique des déchets nucléaires. Bien que

politiquement plus critique, la question des déchets ne masque pas celle, plus générale, de l'approvisionnement énergétique à long terme.

Il existe cependant une approche alternative pour les DHR, la stratégie dite « de transmutation », décrite plus loin, qui doit permettre de résoudre dans une large mesure les problèmes évoqués ci-dessus.

Le développement de nouveaux systèmes nucléaires : vers un nouveau paradigme

Il est communément accepté de classifier les différents types de centrales nucléaires en « générations ». La génération 1 fait référence aux prototypes et aux réacteurs installés jusqu'en 1965 environ. La génération 2 est représentée par les réacteurs encore en fonctionnement aujourd'hui et dont sont équipées la grande majorité des centrales actuelles. Ce sont les réacteurs à eau pressurisés, réacteurs à eau bouillante et autres technologies développées entre 1965 et 1995. La génération 3 a été subdivisée en « 3 » et « 3+ », la version « 3 » partant de 1995 à 2010 (réacteurs avancés) et la « 3+ » dès 2010. En font partie les « European Pressurized Reactors (EPR) » (France / Royaume-Uni / Chine / Inde / Finlande / Etats-Unis).

D'après les prévisions, le marché de l'uranium pourrait commencer à se tendre vers le milieu du siècle. D'où la mobilisation de nombreux pays sur des réacteurs « régénérateurs » qui constituent une réponse définitive vis-à-vis de ce risque de pénurie.

Inscrire le nucléaire dans une perspective de développement durable suppose ainsi de développer une nouvelle génération de réacteurs : « la quatrième génération », capable d'utiliser directement l'uranium naturel ou appauvri. En 2000, le « Forum International Génération IV » (GIF) est né de la volonté de créer un cadre de R&D international sur le nucléaire du futur et faire émerger plus rapidement les technologies les plus performantes à maîtriser.

Douze pays (Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, États-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse) et Euratom ont donc fait le choix d'adhérer à ce forum et de mettre en commun leurs efforts pour développer une nouvelle génération de systèmes nucléaires.

La 4^{ème} génération correspond aux réacteurs, actuellement en conception, qui pourraient voir un déploiement industriel à l'horizon 2040-2050 et devrait donc remplacer la génération actuelle dont l'exploitation toucherait à sa fin. Les quatre objectifs de cette nouvelle génération de réacteurs sont :

- **la sûreté et la fiabilité** : avec une recherche de sécurité sans compromis par rapport aux réacteurs nucléaires actuels (sécurité déterministe au lieu de probabiliste), et en éliminant les besoins d'évacuation de populations résidentes à proximité du site, quelle que soit l'origine d'un éventuel incident ;
- **la durabilité** : les réacteurs doivent être économes en ressources et respectueux de l'environnement (minimisation de la production de déchets) ;
- **la compétitivité économique** : aux plans du coût d'investissement, du coût du combustible, du coût d'exploitation de l'installation et de son démantèlement, et donc par voie de conséquence, du coût de production qui doit être compétitif par rapport à celui d'autres sources d'énergies ;
- **la résistance vis-à-vis de la prolifération nucléaire** (détournement de l'énergie nucléaire vers un usage militaire ou terroriste) et la capacité à être aisément protégés contre des agressions externes.

La conception d'un réacteur nucléaire nécessite d'effectuer un certain nombre de choix technologiques, qui vont au final définir une filière. Au sein du Forum International Génération IV, six concepts de niveaux de maturité différents sont à l'étude. La problématique actuelle n'est pas encore la construction, mais la recherche et le développement industriel de ces filières (annexe 2).

Toutes ces filières sont prévues pour fonctionner avec de l'uranium. Cependant, au moins trois de ces filières peuvent être conçues pour utiliser du thorium en lieu de l'uranium, avec des avantages notables (voir ci-après).

De plus, le nucléaire doit contribuer à la production d'hydrogène, un moyen de stocker l'électricité, en délivrant d'importantes quantités d'hydrogène «vert», avec un des meilleurs «bilan carbone» de toutes les technologies concurrentes (avec l'hydraulique). Il faut souligner à quel point le développement du vecteur énergétique "hydrogène" est crucial pour accélérer l'essor de l'ensemble des énergies renouvelables intermittentes. L'hydrogène sera produit par électrolyse avec l'électricité de centrales nucléaires. Un réacteur à très haute température de quatrième génération pourrait parfaitement, grâce à la « cogénération », c'est-à-dire à la récupération de la chaleur produite lors de la production d'électricité, produire la quantité d'hydrogène nécessaire pour permettre, par exemple, d'alimenter les véhicules à pile à combustible.

Par ailleurs, sans que cette filière soit directement mentionnée comme faisant partie de la génération IV, on admet communément y inclure les **réacteurs sous-critiques** comme les réacteurs pilotés par accélérateur de particules (ADS), qui ont constitué un domaine majeur de recherche dans les années 2000. **Les systèmes ADS sont parmi les plus fiables** pour la simple raison que la coupure du faisceau de protons entraîne l'arrêt des réactions de fission en chaîne. En cas d'arrêt du réacteur (par exemple si une coupure de l'alimentation devait survenir comme cela est arrivé à Fukushima), **la puissance résiduelle est évacuée passivement par convection**, d'où l'impossibilité de fusion du cœur du réacteur. Des développements de cette filière sont en cours, considérée comme la plus efficace pour réduire les déchets de longue durée de vie (annexe 3).

Le thorium, préférable à l'uranium, mais abandonné par le passé pour des raisons militaires

Une alternative à l'uranium comme combustible pour la production d'énergie est le **thorium**. Cet élément constitue à ce jour une source d'énergie encore totalement inexploitée, disponible plus largement sur la planète que l'uranium. Son utilisation pourrait conduire à une perception totalement différente de l'énergie nucléaire par le public, avec moins de craintes pour la sécurité, la santé et les usages militaires de l'atome.

Le thorium (Th) est un élément faiblement radioactif relativement abondant et dont la présence sur la surface du globe est distribuée de façon beaucoup plus uniforme que l'uranium. Il se désintègre plus lentement que la plupart des autres matières radioactives, et les rayonnements alpha émis ne peuvent pas pénétrer la peau humaine. La détention et la manipulation de petites quantités de thorium sont considérées comme non dangereuses tant que l'on ne va pas les inhaler ou les ingérer. Le thorium se trouve en petites quantités dans la plupart des roches et sols, il est quatre fois plus abondant que l'uranium et à peu près aussi fréquent que le plomb. Il se rencontre dans plusieurs minéraux, dont la *monazite*, un phosphate de thorium et de terres rares, qui peut contenir jusqu'à environ 12 % d'oxyde de thorium.

Le thorium n'est pas fissile, mais il peut être transformé en uranium-233 par capture neutronique, dans le cœur même d'un réacteur dédié. L'uranium-233 est un excellent combustible fissile. Les avantages additionnels de tels systèmes et les efforts entrepris actuellement pour son utilisation sont expliqués plus bas. En particulier, **le cycle du thorium est capable de recycler la majeure partie des déchets hautement radioactifs** et de ne laisser à leur place que des déchets de fission de courtes durées de vie. L'annexe 4 résume le développement des réacteurs au thorium.



Une source d'énergie phénoménale : cette boule de thorium contient suffisamment de matière pour satisfaire les besoins en énergie d'un Européen durant toute sa vie.

Comment utiliser le thorium

Principalement, mais non exclusivement, deux approches de l'utilisation du thorium coexistent à ce jour : celle dite ADS « **Accelerator Driven System** » (proposée à l'origine par le Prof. Carlo Rubbia, Prix Nobel de physique et ancien directeur général du CERN) et celle dite MSR « **Molten Salt Reactor** ». Cette dernière fait explicitement partie de la famille des réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération, l'autre en étant apparentée.

Ces deux technologies se basent sur la réaction de fission de noyaux issus d'atomes de thorium.

Un réacteur ADS est appelé *réacteur hybride* car il couple un accélérateur de particules (d'une puissance analogue à celui de l'Institut Paul Scherrer) et un réacteur nucléaire sous-critique, c'est-à-dire incapable, par manque de neutrons, de maintenir une réaction de fission en chaîne. La fraction des neutrons manquants est produite par le bombardement d'une cible de noyaux lourds (plomb, ou tungstène par exemple) par un faisceau de protons issus de l'accélérateur, provoquant ainsi la fission de noyaux fissiles d'uranium-233 et la production de nouveaux noyaux d'uranium-233 par la fertilisation du thorium (c'est-à-dire par capture d'un neutron dans le noyau de l'atome) entourant la cible en question. Le point central est que **la réaction de fission est intrinsèquement dans un état sous-critique**, à savoir que le maintien d'une réaction nucléaire suivie n'est possible que grâce à l'apport extérieur des neutrons issus de l'accélérateur, ce qui confère à ces réacteurs un incontestable niveau de sécurité. En effet, lorsque le faisceau issu de l'accélérateur est interrompu (volontairement ou involontairement lors d'un séisme, par exemple) les réactions de fission stoppent instantanément dans le réacteur.

A l'intérieur du réacteur, l'énergie de fission est récupérée de manière classique sans l'aide de pompes par un fluide caloporteur tel l'hélium gazeux ou du métal fondu (du plomb par exemple). La chaleur est finalement récupérée via un échangeur de chaleur et une turbine à vapeur qui produit l'électricité (voir le schéma).

Grâce à son pilotage par un accélérateur de particules, l'ADS peut moduler facilement sa puissance, si le fonctionnement du réacteur le demande. Il peut fonctionner en tandem avec des sources d'électricité renouvelables, mais fluctuantes, tels le solaire photovoltaïque et l'éolien, et compléter leurs manques de production.

Les ADS peuvent également être utilisés comme **incinérateurs de déchets nucléaires** (avec ou sans production d'énergie) où l'on "brûle" les actinides mineurs et éventuellement le plutonium. Les actinides mineurs sont en effet les composants les plus nuisibles et les plus difficiles à éliminer ou à stocker produits par les réactions de fission nucléaire au sein d'un réacteur, car hautement

radioactifs et à durée de vie très longue. Ils constituent le noyau dur de la problématique des déchets radioactifs issus des réacteurs nucléaires classiques (annexe 6).

La seconde famille de réacteurs au thorium fait partie de celle des MSR « Molten Salt Reactor ». Plusieurs variantes de tels réacteurs existent et sont à l'étude dans le monde. Toutefois, leur conception générale est comparable : il s'agit de réacteurs dans lequel le combustible nucléaire se présente sous forme de sel fondu liquide à haute température (600 à 900 °C), celui-ci jouant à la fois le rôle de source d'énergie et de fluide caloporteur (qui transfère la chaleur produite dans le réacteur pour faire tourner les turbines productrices d'électricité). Le réacteur peut être soit modéré par du graphite (neutrons thermiques) ou soit sans modérateur (neutrons rapides). Dans ce dernier cas, on parle de réacteur MSFR « Molten Salt Fast Reactor ». Le concept a été étudié en laboratoire pendant les années 1960, puis délaissé dans les années 1970 notamment parce qu'il n'était pas exploitable pour des applications militaires.

À partir des années 2000, le système MSR a été réévalué, puis retenu au sein du Forum International Génération IV. Aujourd'hui, il fait l'objet de recherches en vue d'un déploiement comme réacteur de quatrième génération. Par exemple, l'Europe a soutenu le projet Samofar « Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor », regroupant diverses institutions de recherche et de grandes entreprises européennes. L'Institut Paul Scherrer a participé à cet effort et bénéficie de son successeur, le projet Samosafer. Les réacteurs à sels fondus reposent sur l'utilisation d'un sel fondu, par exemple du fluorure de lithium, servant à la fois de fluide caloporteur, de modérateur et de première barrière de confinement. Ces sels sont extrêmement stables et peuvent être portés à haute température - à pression atmosphérique - pour être fondus, ceci sans risque pour l'environnement (pas d'émission de gaz ou de particules radioactives en cas de fissuration de la cuve, pas d'interaction avec l'eau et l'air). Le réacteur prend la forme d'une cuve métallique contenant le sel à haute température (600 à 900 °C) mais à *pression ambiante*. La réaction nucléaire est déclenchée par la concentration de matière fissile, en l'occurrence de l'uranium-233 issu de la fertilisation du thorium sous l'effet de la réaction nucléaire. Dans la conception d'un réacteur à neutrons rapides, il n'existe pas de modérateur, ce qui nécessite une charge initiale plus importante de combustible fissile. La puissance du réacteur est maîtrisée par la dilatation du sel : dès la conception du réacteur, le régime maximal est défini par la concentration en matière fissile et le volume du réacteur. Sous l'effet de la température, la dilatation du sel réduit la probabilité de fission et ralentit le processus jusqu'au point d'équilibre : **le système est naturellement autorégulé**. Le concept associe au réacteur une unité de traitement du combustible usé intégré dans le processus, chargée de séparer les produits de fission et les actinides mineurs au fur et à mesure de leur production dans le réacteur. Ces derniers sont réinjectés dans le réacteur pour être éliminés au cours du processus.

D'autre part, la technologie des réacteurs au thorium à **très hautes température (HTGR)** est étudiée dans le cadre du GIF, pour leur haute sécurité et leur mise à disposition du marché dans un proche avenir.

Principaux avantages du thorium : sécurité, résistance à la prolifération nucléaire, réduction des déchets radioactifs

Les avantages de l'utilisation du thorium ont été présentés depuis quelques années, par exemple, lors d'une conférence internationale tenue au CERN en 2013 par l'iThEC « international Thorium Energy Committee ». Les spécialistes du monde entier étaient représentés. Les comptes rendus sont disponibles (11).

En matière de prolifération nucléaire, c'est un progrès significatif puisque la production de plutonium-239 y est négligeable et que l'extraction de l'uranium-233, présent dans le réacteur, est particulièrement difficile, au contraire de ce qui se passe dans les réacteurs à eau pressurisée actuels. Le rayonnement radioactif d'un des produits de désintégration de l'uranium-232 également présent dans le combustible est si élevé, que sa manipulation hors enceinte serait extrêmement problématique.

Dans le cas de MSR et des MSFR, le niveau de sécurité est également extrêmement élevé. En effet, si la température du cœur du réacteur devait croître (en cas de coupure de courant électrique par exemple), **le processus est non seulement autorégulé, mais une autre sécurité est aussi prévue** : au fond de la cuve, un bouchon en sels est conçu pour fondre en cas d'augmentation de la température : la totalité du combustible fondu dans les sels de la cuve primaire se déverserait par gravité dans plusieurs récipients disposés en dessous et conçus pour qu'aucune réaction nucléaire ne puisse survenir. La température baisserait alors sous le seuil de solidification et l'ensemble se transformerait en solide, empêchant toute émanation de gaz ou de particules radioactives. Notons enfin que le fluide caloporteur étant les sels fondus eux-mêmes, il n'y a pas d'eau dans le cœur du réacteur, d'où **aucune émanation d'hydrogène en cas de surchauffe**, ce qui est un avantage considérable sur le plan de la sûreté de l'installation. L'hydrogène est en effet un gaz hautement explosif qui a considérablement compliqué la tâche de sauvegarde de la centrale de Fukushima lors de la catastrophe.

En ce qui concerne les déchets radioactifs, **les réacteurs au thorium permettent de réduire considérablement la quantité de déchets radioactifs dangereux à long terme** : les actinides, hautement radioactifs et à durée de vie très longue, peuvent presque entièrement disparaître par multicyclage et retraitement. Cela signifie que les seuls déchets générés par un tel réacteur sont les produits de fission. De plus, le multicyclage est particulièrement aisé dans un réacteur à sel fondu et peut se faire en continu en cours d'opération par petites quantités. Globalement, après 60 ans de fonctionnement, il ne resterait que 10% de la quantité de déchets finalement produits par un réacteur MSFR, ce qui est considérablement plus faible qu'avec les réacteurs actuellement en fonctionnement, et ceci avec pratiquement plus d'actinides. A long terme, c'est-à-dire après 300 ans, la radioactivité résiduelle serait beaucoup plus basse que celle actuellement générée par les réacteurs existants (une radioactivité de l'ordre de celle émise par la cendre de charbon). Par ailleurs, il faut mentionner qu'en principe les actinides produits par les centrales actuelles devraient pouvoir être consommés dans un réacteur au thorium, dans la mesure où ces déchets radioactifs ne sont pas fondus dans du verre, comme c'est actuellement la pratique.

Les ressources en thorium sont disponibles et durables

L'élément thorium est 3 à 4 fois plus abondant dans la croûte terrestre que l'uranium, soit un facteur 500 par rapport à l'uranium-235. Il se présente, par exemple, comme un composant de la minérale monazite, qui peut être extrait dans le sable et les dépôts alluviaux. Aujourd'hui, seuls des métaux de terres rares sont extraits de la monazite et sont utilisés, par exemple, dans les modules solaires et les moteurs d'éoliennes. Le thorium est stocké comme réserves stratégiques. Le groupe Solvay dispose de quantités importantes d'oxyde et de nitrates de thorium en France (usine de Rodhia à La Rochelle : 6'200 tonnes ; CEA Cadarache : 2'300 tonnes) et la réserve stratégique américaine au Nevada comprend 3 millions de tonnes de nitrate de thorium.

Les réserves exploitables sont bien distribuées dans le monde (voir OECD/IAEA/Uranium 2014). Par ordre d'importance, on trouve l'Inde, le Brésil, l'Australie, les Etats-Unis, la Turquie, le Venezuela, etc. L'exploitation des seules réserves connues à ce jour pourrait produire autant d'énergie qu'utilisé actuellement dans le monde pendant environ 20'000 ans. Le thorium représente donc une source d'énergie «durable» dans le sens où il durera suffisamment longtemps pour que de futures technologies innovantes prennent le relais.

Un entretien avec la Commission brésilienne de l'énergie nucléaire (Comissão Nacional de Energia Nuclear) et ELETROBRAS ELETRONUCLEAR, l'entreprise responsable de la production de l'électricité nucléaire consommée au Brésil, figure en annexe 5.

Etat du développement des systèmes nucléaires au thorium

Le thorium pourrait techniquement être utilisé dans des réacteurs de type classique dans des conditions similaires à l'utilisation de l'uranium appauvri :

- Comme couverture fertile dans un réacteur à neutrons rapides, pour produire directement de l'uranium-233 fissile ;
- Comme combustible mixte mélangeant le thorium à du plutonium, utilisable dans les mêmes conditions que le combustible MOX dans un réacteur à eau pressurisée ou un réacteur à eau bouillante, pour brûler le plutonium produit par le cycle de l'uranium.

Par exemple, la société Thor Energy en Norvège étudie actuellement du combustible au thorium dans le réacteur de Halden dans le but de le commercialiser pour des réacteurs refroidis à l'eau.

Mais comme indiqué plus haut, une autre voie possible consiste à mettre en œuvre des réacteurs à sels fondus, MSR, où ceux-ci jouent à la fois le rôle de combustible et de fluide caloporteur. Cette voie est à l'étude dans plusieurs pays comme la France, les États-Unis, la Chine, l'Inde et le Japon. Le développement des MSR est actuellement très diversifié, poursuivi aussi par des entreprises privées, en particulier Fluide Energy, Terrestrial Energy, Elysium Industries, ThorCon Power, Moltex Energy, Seaborg Technologies, Copenhagen Atomics, TerraPower. Cette diversité est considérée comme saine, similaire au développement initiaux des ordinateurs personnels dans les années 1970, jusqu'à ce qu'un concept particulier fasse une percée.

L'Inde, avec environ un tiers des réserves mondiales de thorium, s'est clairement engagée dans la voie du thorium dans le cadre de son ambitieux programme de développement nucléaire civil. Des technologies indigènes ont été développées pour tous les aspects du cycle du combustible au thorium, c'est à dire l'exploitation minière, la fabrication du combustible, l'irradiation du combustible, le retraitement et la gestion des déchets. La conception de systèmes de réacteurs de différents types a été étudiée. La conception d'un système avancé, dont l'évaluation du site est en progrès, utilisera un combustible basé sur le thorium et inclut de nombreux concepts de sécurité renforcés. Il est développé sous la forme d'un démonstrateur technologique pour un cycle du thorium à l'échelle industrielle. L'Inde a aussi planifié l'utilisation du thorium dans un réacteur à haute température, dont le but sera la production d'hydrogène par fractionnement de l'eau, réduisant la dépendance du pays à l'importation de pétrole. Pour la troisième phase du développement du programme nucléaire indien, on envisage le déploiement à grande échelle de réacteurs régénérateurs avec combustible uranium-233/thorium sous la forme de sels fondus avec retraitement en ligne (11).

En Chine, le « Shanghai Institute of Nuclear Applied Physics » (SINAP) suit deux voies parallèles de développement d'un réacteur au thorium à sel fondu, l'une avec combustible solide et l'autre avec combustible liquide dissous dans un refroidisseur au fluor, dans le but de remplacer à long terme les combustibles à l'uranium.

A Petten, aux Pays-Bas, une boucle expérimentale de sel fondu incluant du combustible fissile (LUMOS) est en préparation sur le réacteur à haut flux HFR.

Dans le domaine des Accelerator-Driven Systems (ADS), le 7 septembre 2018, le gouvernement fédéral belge a décidé la réalisation d'une nouvelle grande infrastructure de recherche, MYRRHA, qui sera construite sur le site du laboratoire SCK•CEN. Son rôle comprendra une contribution internationale au traitement des déchets nucléaires par séparation et transmutation, le développement d'applications de radioisotopes médicaux, la recherche de matériaux pour la fusion nucléaire et les technologies innovantes d'accélérateurs. A terme, ce projet contribuera aussi au développement de l'utilisation du thorium dans un réacteur sous-critique avec combustible solide piloté par un accélérateur linéaire. Le fluide caloporteur sera un alliage de plomb fondu.

L' « Institute of Modern Physics » à Lanzhou dans la province de Gansu en Chine développe le projet appelé ADANES, selon un plan de 20 ans, pour transmuter les déchets avec un accélérateur couplé à un réacteur refroidi au plomb fondu. Deux versions de l'injecteur de l'accélérateur linéaire ont été construites. Le développement de la cible de spallation (soit l'éclatement de noyaux atomiques par bombardement de neutrons ou de protons à très haute énergie) et le réacteur seront poursuivis dans un nouveau laboratoire en construction à Huizhou.

An Japon, la technologie du retraitement et de la transmutation est en phase de recherche et de développement, avec la construction de nouvelles infrastructures expérimentales au laboratoire JPARC pour l'étude de la faisabilité des ADS refroidis par sels fondus. Un groupe de travail a étudié l'application du thorium dans les réacteurs refroidis à l'eau et les réacteurs rapides (mars 2015).

En ce qui concerne la fabrication du combustible au thorium, de l'expérience a été développée dans plusieurs pays comme l'Inde ou la Norvège. Une technologie du retraitement adaptée, le traitement pyrométallurgique, qui a l'avantage de ne pas séparer le plutonium des autres actinides, a été développée au laboratoire national d'Argonne aux Etats-Unis (annexe 7).

Compétitivité économique

Une des contraintes que s'est imposé le Forum Génération IV concerne la compétitivité économique des nouvelles centrales. Elle touche principalement trois domaines : une réduction des coûts d'investissements (y compris le démantèlement), des coûts de fonctionnement, ainsi que l'assurance d'une disponibilité supérieure à 90%.

Plusieurs stratégies de réduction des coûts sont communes à la génération IV : il s'agit notamment **d'une conception des centrales plus simple et standardisée**, de la fabrication de certaines parties en usine et non uniquement sur place, **de la modularisation, d'un temps de construction réduit, d'une densité de puissance accrue tout comme d'une efficacité plus élevée**.

L'utilisation du thorium offre un avantage supplémentaire, au vu de sa relative abondance par rapport à l'uranium. De même, l'exploitation du principe de régénération permet une économie de combustible très importante (de l'ordre de 200 fois moins) et une réduction parallèle du volume des déchets, pour une puissance équivalente. De plus, les réacteurs, fonctionnant à température plus élevée que les systèmes de génération II, permettent un meilleur rendement énergétique.

Un autre facteur favorable, abondamment discuté dans le cas des sels fondus ainsi que pour les « Accelerator-Driven Systems » est leur modularité. Les **petits réacteurs modulaires**, en anglais « Small modular reactors » **SMR**, sont une catégorie de réacteurs nucléaires de taille plus faible que les réacteurs conventionnels. Ceux-ci représentent concrètement deux avantages : l'adaptation aux besoins de la puissance nécessaire, réduisant ainsi la taille des réseaux de distribution, et la capacité de voir les systèmes partiellement ou complètement construits sur des chaînes de montage dans des usines.

Enfin, ces systèmes étant intrinsèquement beaucoup plus sûrs, les sécurités de type passives peuvent être considérablement simplifiées. En se basant sur ces diverses caractéristiques, on trouve quelques estimations des coûts de développement et de fonctionnement. Pour les sels fondus, selon la méthode des coûts actualisés, le coût total (investissements + exploitation + combustible) est estimé globalement à 25 % des coûts d'une centrale actuelle, soit 1,37 c/kWh comparé à 6,22 c/kWh (12). Ce résultat est confirmé par une autre source (13). Le développement d'un tel système est quant à lui estimé à 11 milliards de dollars, un prix inférieur au coût de développement de l'Airbus A380 (13 milliards de dollars) à titre de comparaison.

Une autre étude (14) estime le prix du kWh au cours de la vie d'une centrale aux sels fondus un peu plus élevé (3,8 c/kWh), mais toujours inférieur aux centrales à eau existantes, et même qu'aux coûts des centrales à charbon.

En ce qui concerne l'ADS, une analyse (15) qui date quelque peu (février 1996), mais dont l'intérêt réside dans son comparatif entre systèmes, met en avant (table 30, p.71) des coûts de l'ADS inférieurs de plus de 50 % par rapport au nucléaire actuel, et de plus de 60% inférieurs aux coûts d'une centrale à gaz ou au charbon.

Il apparaît ainsi que sur le plan des coûts, la génération IV, et en particulier les systèmes à base de thorium, sont clairement plus favorables que ceux des générations précédentes.

La Suisse a intérêt à participer à la recherche mondiale sur les nouveaux réacteurs au thorium

Selon la NAGRA, au sujet de la transmutation, « une telle transformation est envisageable en théorie, mais encore impossible à mettre en pratique en l'état actuel des connaissances techniques. Les procédés qui seraient nécessaires font actuellement l'objet de recherches » (16). La Suisse a intérêt à participer à ces recherches. Ceci requiert des études technologiques et, éventuellement, en parallèle, une analyse de l'« avenir technologique » sous l'angle des conséquences sociales, économiques, écologiques, éthiques, juridiques et politiques. La Fondation pour l'évaluation des choix technologiques (TA-Swiss) pourrait se charger de telles analyses prospectives.

Proposé par iThEC, le concept d'ADS au thorium refroidi par circulation de plomb liquide est une initiative qui a démarré en Suisse. Ce concept est d'ailleurs particulièrement bien adapté à notre pays. Les compétences déjà présentes sur le territoire helvétique, notamment au PSI, au CERN et dans les Ecoles polytechniques, permettent la maîtrise de l'accélérateur de particules et de la cible de spallation, les éléments les plus critiques du système. L'option innovante d'un cyclotron comme accélérateur de particules est privilégiée par rapport à celle d'un accélérateur linéaire, comme illustrée dans le schéma ci-dessous.

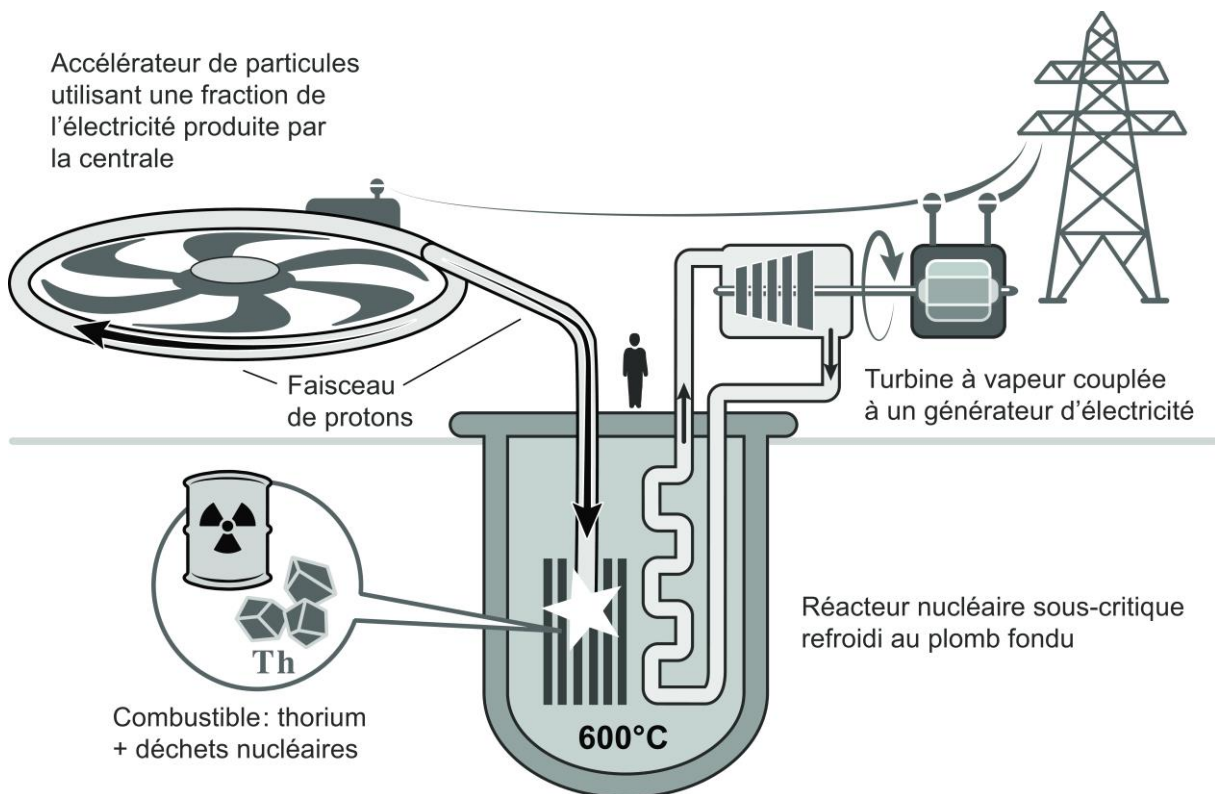


Schéma du projet d'ADS au thorium de l'International Thorium Energy Committee (iThEC)

On pourrait envisager de développer certains aspects en Suisse. En particulier l'étude du cyclotron de très haute puissance, incluant l'augmentation de la fiabilité nécessaire à un ADS (17). En effet, le cyclotron de 590 MeV du PSI accélère déjà des faisceaux de 1,4 MW de puissance, un record du monde, et il existe des plans pour porter cette puissance à 1,8 MW. De plus, la Confédération soutient un programme de développement d'aimants supraconducteurs à hautes températures sous le sigle de CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), dont on pourrait envisager d'étendre les efforts vers les cyclotrons de hautes puissances. Ce type de développement est par ailleurs nécessaire aussi pour la physique fondamentale des neutrinos. D'autres domaines de compétences existent aussi dans les Hautes écoles suisses, en particulier pour les cibles de haute puissance en métal liquide, la conception des cœurs de réacteurs à neutrons rapides, etc. Un projet mené dans le cadre d'une collaboration internationale aurait toutes les chances de conduire à une réalisation concrète dans des délais raisonnables.

Conclusions

L'Art 74a de la loi sur l'énergie nucléaire prévoit que « Le Conseil fédéral fait régulièrement rapport à l'Assemblée fédérale sur le développement de la technologie nucléaire ». Par cet article, l'Assemblée fédérale a souhaité laisser la porte ouverte aux nouveaux paradigmes dans le domaine du nucléaire.

Grâce aux centrales hydrauliques et nucléaires, faibles émettrices de CO₂, le courant électrique suisse est l'un des plus « propres » du monde, avec seulement 33 grammes de CO₂ émis pour chaque kilowattheure électrique produit. Mais, du fait des importations, le courant consommé dans le pays présente une intensité carbone moyenne nettement supérieure : 129 gCO₂/kWh. Pour la moyenne des pays de l'OCDE, il faudrait réduire l'intensité carbone de 430 gCO₂ par kWh à environ 50 gCO₂ par kWh d'ici à 2050, afin d'atteindre les cibles fixées par les accords internationaux sur le climat. Une étude récente (18) montre qu'il est possible d'atteindre ce but avec une combinaison d'énergie nucléaire, d'hydroélectricité et de renouvelable variable en respectant de hauts standards de sécurité d'approvisionnement et de coûts raisonnables pour les consommateurs.

La Suisse a tout intérêt à participer aux projets de recherche et développement internationaux dans ces domaines. Elle doit en particulier jouer un rôle dans le développement de technologies pour des réacteurs nucléaires plus sûrs et plus efficaces, afin de préserver ses propres jugements à l'avenir. Les réacteurs dits de Génération IV doivent donc être évalués de manière continue du point de vue de la sécurité, de la durabilité, de l'économie, et de la réduction des déchets radioactifs. Certains de ces systèmes pourraient être validés dans la prochaine décennie et être déployés industriellement à l'horizon 2040-2050 en Chine, Russie et France. Les systèmes au thorium promettent de remplir ces conditions et méritent d'être pris en considération pour l'approvisionnement futur du pays et du monde en énergie.

En particulier, suite aux travaux réalisés au CERN, les « Accelerator Driven Systems » capables de transmuter les déchets des combustibles nucléaires usés en éléments de plus courte durée de vie avant enfouissement, devraient faire l'objet d'études et de soutiens en Suisse. On pourrait commencer par mettre rapidement en place une école d'été, chargée d'informer les jeunes scientifiques et ingénieurs sur les applications des ADS au thorium pour la production d'énergie propre, la réduction de la prolifération nucléaire et la gestion des déchets nucléaires.

Références

1. World Economic Forum, Fostering Effective Energy Transition, 2019 edition
2. <https://www.iea.org/statistics/electricity/>
3. <https://www.statista.com/statistics/513671/number-of-under-construction-nuclear-reactors-worldwide/>

4. <https://www.statista.com/statistics/268154/number-of-planned-nuclear-reactors-in-various-countries/>
5. IPCC, Global Warming of 1.5 °C, 2018
6. Ibidem, P1 à P4, page 16 du « summary for policymakers »
7. <https://webstore.iea.org/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>
8. Statistique globale suisse de l'énergie 2017, Rapport Office fédéral de l'énergie, OFEN, projections pour 2018
9. <https://www.swissolar.ch/fr/>
10. <http://www.swissnuclear.ch/fr/production-deelectricite-nucleaire-2018-les-centrales-nucleaires-suissees-enregist- content---1--43--402.html>
11. www.springer.com/gb/book/9783319265407
12. <http://pages.hmc.edu/evans/LamThorium.pdf>
13. <https://www.energycentral.com/c/ec/lfr-how-much-will-it-cost>
14. http://ralphmoir.com/media/coe_10_2_2001.pdf
15. <https://cds.cern.ch/record/297967/files/lhc-96-001.pdf>
16. <https://www.nagra.ch/fr/transmutationfr.htm>
17. http://indico.cern.ch/event/300409/contributions/1663600/attachments/565895/779581/Accelerators_for_ADS.pdf
18. OECD Nuclear Energy Agency, Nuclear Technology Development and Economics: The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables.

ANNEXE 1. Préservation du potentiel technologique nucléaire de la Suisse et gestion de son patrimoine, conclusion d'un document récent du Professeur Andreas Pautz de l'EPFL et du PSI (1).

*"Ce document a été rédigé pour **sensibiliser l'opinion au problème urgent du maintien des capacités nucléaires** en présentant, indépendamment de la décision de supprimer progressivement les centrales nucléaires existantes, les principales priorités de recherche qui resteront pertinentes pendant plusieurs décennies. Dans la phase de transition de la Stratégie 2050, les centrales nucléaires continueront de représenter une part importante de la consommation suisse d'électricité. Alors que la Suisse dispose encore d'une main-d'œuvre relativement stable dans les domaines nucléaires de l'industrie, de la recherche et de la réglementation ainsi que d'installations nucléaires de premier ordre (p. ex. le laboratoire chaud et plusieurs bancs d'essai au PSI ainsi que le réacteur de recherche CROCUS à Lausanne), l'enseignement spécifique dans le domaine nucléaire est limité à un programme relativement restreint à l'EPFL, à l'ETH Zurich et au PSI. Les programmes traitant de l'impact socio-économique de l'énergie nucléaire, des facteurs humains ou de l'évaluation des risques sont extrêmement rares et seuls quelques éléments peuvent être trouvés dans les HES. Les cours de formation pour les opérateurs de centrales nucléaires ne sont disponibles qu'au PSI. Il y a lieu de craindre que ces plates-formes de formation ne deviennent insuffisantes dans un avenir proche.*

*Nous proposons la création d'un réseau, d'un centre de compétences pour la formation nucléaire, le maintien des compétences et la gestion du patrimoine, dont le PSI serait la maison mère, regroupant toutes les institutions suisses actives dans ce domaine et regroupant les activités nationales de recherche et de formation pour **assurer la transition de la production nucléaire en respectant les précautions de sécurité les plus strictes jusqu'au dernier jour de production des centrales suisses actuelles et au-delà, ainsi que la participation suisse aux efforts internationaux pour améliorer et promouvoir la sûreté nucléaire dans le monde.** »*

(1) Preserving Competence in Nuclear Technology and Managing its Legacies, Andreas Pautz, Head of the Nuclear Energy and Safety Division at the Paul Scherrer Institut (PSI), and Professor for Nuclear Engineering at École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

ANNEXE 2. Les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV

Les six systèmes étudiés par les membres du Forum Génération IV sont les suivants.

- Réacteurs à neutrons rapides avec réfrigérant gazeux,
- Réacteurs à neutrons rapides avec liquide de refroidissement au sodium,
- Réacteurs rapides refroidis au plomb (réacteurs LFR). Ce système présente un avantage important : la compatibilité du plomb (et de ses alliages) avec l'eau et l'air. Par exemple, il est possible de placer les générateurs de vapeur directement dans le réservoir primaire.

Ces trois systèmes ont un flux neutronique qui n'est pas ralenti (environ 20 000 km/s), contrairement aux réacteurs du parc actuel (2 km/s). Ils utilisent la fertilité de l'uranium-238 (naturel ou appauvri), qui, irradié par des neutrons rapides, est directement transformé en plutonium-239 fissile. Avec la même quantité d'uranium, on pourrait alors produire 50 à 100 fois plus d'électricité que les réacteurs actuels. Les ressources en uranium seront alors sécurisées de manière durable. De plus, l'un des plus grands intérêts des réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération est de faciliter l'élimination des déchets radioactifs en réduisant le volume et la radiotoxicité intrinsèque à long terme des déchets ultimes. Ces neutrons rapides ont l'avantage de fissionner tous les noyaux lourds et pas seulement les matières fissiles. Ces réacteurs peuvent être en mesure d'incinérer une proportion importante des éléments radioactifs à vie longue qui constituent les déchets : les actinides mineurs (américium, neptunium, curium). Les déchets ultimes se limiteraient alors aux produits de fission exempts d'actinides mineurs. Ils seraient plus faciles à stocker et retrouveraient le

niveau de radioactivité de l'uranium naturel non pas après environ dix mille ans, mais après environ 300 ans. Cette technologie permettra donc de préserver les stockages en augmentant leur densité.

Les trois autres filières sont les suivantes :

- Réacteurs refroidis à l'hélium, avec des températures très élevées qui génèrent de la chaleur (à environ 1 000°C). Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour produire de l'électricité ou de l'hydrogène ou même une combinaison de ces applications ("cogénération").
- Réacteurs à eau supercritiques. Ce concept de réacteur maintient le système de refroidissement primaire à base d'eau (comme les EPR actuels), mais fait passer celle-ci à un état "supercritique" - entre l'état gazeux et l'état liquide. Cela augmente l'efficacité énergétique (et améliore ainsi la compétitivité économique).
- Réacteurs au sel fondu, ou « Molten salt reactor system MSR ». Un réacteur au sel fondu est basé sur le principe de l'intégration directe du combustible dans le fluide de refroidissement. L'objectif est de combiner la production d'énergie et le recyclage du combustible dans une seule installation.

L'échéance de 2040/2050 pour l'utilisation des réacteurs de quatrième génération n'est pas seulement déterminée par les progrès de la recherche et du développement. Cette date est aussi et surtout la date à laquelle il est nécessaire d'être prêt face aux nouveaux défis énergétiques, l'uranium de haute teneur étant une ressource limitée.

D'autres modèles de réacteurs potentiels dérivés des grands concepts retenus présentent un intérêt pour divers chercheurs et entreprises du monde entier. Tous ces systèmes sont conçus pour fonctionner à l'uranium. Cependant, au moins trois de ces systèmes peuvent être conçus pour utiliser du **thorium au lieu de l'uranium**, ce qui présente des avantages significatifs.

ANNEXE 3. Recherche et développement sur les réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateurs (ADS)

La filière ADS représente une implémentation du réacteur rapide au plomb fondu LFR du GIF. Cette filière demande encore recherche et développement industriel dans les domaines des accélérateurs de haute puissance, des matériaux supportant la corrosion par les métaux liquides, de la fabrication et du retraitement du combustible, etc. On estime qu'il faudra de 10 à 15 ans pour mettre au point un système de démonstration, suivi de cinq ans d'essais qui permettraient son utilisation au plus tard dans les années 2050-2060. Il est à noter que cette période correspond à la limite de disponibilité de l'uranium et à la fin de vie des réacteurs de troisième génération.

En ce qui concerne les développements en cours, on notera par exemple, celui d'accélérateurs de haute puissance au PSI, en France, Etats-Unis, Italie, ainsi que de la cible de spallation en plomb bismuth MEGAPIE au PSI et qui a été testée avec succès. Par ailleurs, la Suisse participe à la construction de la source de neutrons ESS de 5 MW en Suède. Des réacteurs refroidis au plomb liquide ont été développés en Russie depuis de nombreuses années, des projets sont en cours en Belgique (projet MYRRHA), au Luxembourg (société Hydromine) et en Roumanie (projet de démonstrateur technologique refroidi au plomb, ALFRED, dont les études sont pilotées par la Roumanie et l'Italie).

Dans le but d'accélérer le processus de développement des différentes composantes du système, une coopération internationale est nécessaire pour construire un démonstrateur industriel ADS. En 2011, une association basée en Suisse, iThEC « International Thorium Energy Committee », a été fondée. Après avoir organisé une conférence internationale au CERN et après de nombreux contacts en Suisse et à l'étranger, elle propose de trouver des investissements publics et privés pour le développement d'un tel système nucléaire. La coopération des Etats-Unis serait également

intéressante, ceci notamment en raison d'un environnement politique favorable au développement de concepts de réacteurs de nouvelle génération. Ainsi, des lois ont récemment été adoptées pour faciliter les partenariats entre les laboratoires de recherche nationaux et le secteur privé (1), et pour demander aux régulateurs du domaine nucléaire de faciliter les processus pour les concepts de réacteurs avancés (2).

(1) [Nuclear Energy Innovation Capabilities Act](#)

(2) [Nuclear Energy Innovation and Modernization Act](#)

ANNEXE 4. Chronologie du développement des systèmes au thorium

Dans les années 1960, l'Oak Ridge National Laboratory aux Etats-Unis, dirigé par Alvin Weinberg, a mené des recherches sur les réacteurs au sel fondu, en particulier le MSRE, le « réacteur expérimental au sel fondu » (1965-1969), un petit réacteur de 7,4 MWth qui a démontré la faisabilité et l'intérêt d'un combustible au thorium ainsi que la résistance à la corrosion des aciers utilisés.

À Shippingport, la validité du concept de régénération dans le cycle thorium-uranium-233 est également démontrée depuis 1977. Avec l'expérience d'Oak Ridge sont ainsi confirmés les principes fondamentaux de l'utilisation du thorium comme combustible.

Plusieurs autres essais ont également été effectués avant et après celui de Shippingport :

Reactors operated with substantial amounts of thorium					
Reactor	Type	Location	Operating period(with thorium)	Thermal power (MWt)	Electric power (MWe)
Elk River	BWR	USA	1962-1968[9]	58	15*
Indian Point	PWR	USA	1962-1964[9]	615	151
Peach Bottom 1	HTGR-prismatic	USA	1966-1972[8]	115	40
Shippingport	LWBR**	USA	1977-1982[8]	236	60
Fort St Vrain	HTGR-prismatic	USA	1974-1989[9]	842	330
AVR	HTGR-pebble	Germany	1967-1988[8]	45	15
THTR	HTGR-pebble	Germany	1985-1989[8]	750	300

Various	PHWR	India	Ongoing	–	–
Dragon	AGR	England	1966-1973	20	
FBTR	LMFBR	India	Ongoing	40	
* Plus additional from fossil-fired super heaters.					
** Data represent LWBR core, not original Shippingport core, which did not use thorium or ²³³ U					

On peut également mentionner :

1960-1980: travail expérimental limité sur l'utilisation du thorium dans les « High Temperature Reactors » (DRAGON, ATR, THTR, carbure de thorium-uranium et combustibles oxydes) et dans le réacteur à eau bouillante de Lingen par SIEMENS (Th-MOX)

1990-2002: projet EURATOM « Le cycle thorium en tant qu'option de gestion des déchets »

1998-2008: expériences sur les combustibles thoriums (Projets THORIUM CYCLE, OMICO, LWR-DEPUTY avec irradiations à KWO-Obrigheim)

FP7 (2011-13): Etude de faisabilité sur le stockage géologique dans le cadre de l'utilisation du thorium (SKIN Project)

FP5-FP7 (1998-maintenant): études des combustibles au thorium et définition d'un réacteur à sels fondus (Projets MOST, ALISIA, EVOL...)

L'Accelerator-Driven System (ADS) apparait en 1990 et a fait depuis l'objet de nombreuses études. La contribution du CERN (FEAT, nTOF) est vue comme essentielle pour cette technologie.

En 1998, les ministères de la recherche en France, Italie et en Espagne établissent un groupe de conseillers ministériels sur l'ADS. Ceux-ci publient en 2001 un rapport intitulé « Une feuille de route européenne pour le développement de l'ADS pour la transmutation des déchets nucléaires » (1).

Dans la communauté européenne de recherche nucléaire, une plateforme technologique appelée SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) réunit une grande partie des acteurs impliqués dans la conception des réacteurs. Le SNETP a publié un Agenda de recherche stratégique en mai 2009, révisé en 2013 suite à l'accident de Fukushima, avec une annexe consacrée au thorium. Dans cette annexe, les systèmes au thorium sont qualifiés comme « ayant des potentialités à long terme significatives, mais également des défis importants avant d'atteindre le stade industriel » (2). En Suisse, une initiative privée, iTheC (international Thorium Energy Committee) collabore avec des ingénieurs du CERN pour faire mieux connaître cette technologie et contribuer à sa réalisation (3).

Dans le reste du monde, l'ADS a démontré qu'il savait engendrer beaucoup d'intérêt, notamment en Inde et en Chine, où son développement se poursuit à l'heure actuelle.

(1) <https://www.oecd-nea.org/pt/docs/ADS%20ROADMAP.pdf>

(2) <https://www.oapen.org/download?type=document&docid=1001893#page=198>

(3) <http://ithec.org/en/accueil/>

ANNEXE 5. Entretien avec la Commission de l'Énergie nucléaire du Brésil (CNEN) et le Président Directeur Général d'ELETROBRAS ELETRONUCLEAR.

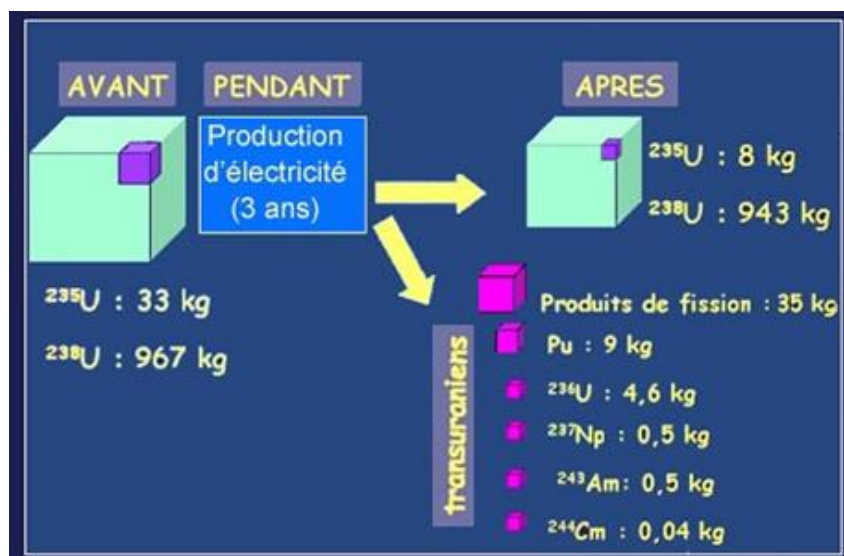
Le Brésil a une longue tradition dans la technologie du thorium; l'expérience accumulée est d'importance stratégique pour le pays, d'une part à cause de ses énormes réserves et d'autre part par la résurgence de l'intérêt de l'utilisation du thorium pour les réacteurs nucléaires (Journal of Energy and Power Engineering 8 (2014) 1983-1990). Il est possible que le thorium constitue la plus importante réserve d'énergie du Brésil, dépassant celles du pétrole (malgré les gisements pré-salifères) et de l'uranium. Pour Eletronuclear, le thorium a le plus grand potentiel au monde pour la production d'énergie. Les scientifiques doivent expliquer comment utiliser cette source d'énergie encore inexploitée. Beaucoup d'efforts ont déjà été fait au Brésil dans les années soixante sur son utilisation pour la production d'énergie. Les documents correspondants sont à disposition. Mais les grandes réserves du Brésil n'ont pas encore été exploitées.

Le thorium a été produit en excès par rapport à la demande lors de l'extraction des terres rares. Le marché de ces dernières provenant de la Monazite, qui contient du thorium, a passé maintenant presque totalement à la Chine.

ANNEXE 6. La destruction des déchets nucléaires à longue durée de vie

A l'issue de son séjour en réacteur, le combustible nucléaire utilisé issu des centrales actuelles de génération II est composé de trois parties :

- De l'uranium-238 (« matrice » présente au départ du cycle à 95%), non fissile. Il contient moins de 1% d'uranium-235 fissile, dans une proportion quasiment identique à l'uranium naturel.
- Des produits de fission. Ce sont les noyaux issus de la fragmentation du noyau d'uranium-235 sous l'impact d'un neutron : iode, césium,... Ces produits de fission ont à quelques exceptions près une durée de vie courte et se transforment en matière stable dans un intervalle allant de quelques minutes à quelques années.
- Des « transuraniens », noyaux plus lourds que l'uranium-238. Ceux-ci résultent d'une capture d'un neutron par un noyau d'uranium-238, qui n'est pas naturellement fissile. Le noyau d'uranium-238 peut ainsi se voir « alourdi » de plusieurs neutrons, créant ainsi par désintégration radioactive plusieurs autres éléments (plutonium et « actinides mineurs », à savoir amerícium, neptunium, curium, etc...). Ce sont ces derniers éléments qui sont les déchets les plus nocifs et à longue durée de vie, de l'ordre du million d'années.



Exemple de composition d'un combustible utilisé

Le combustible usé est stocké. Il doit être isolé de l'environnement, car il est très radioactif, c. à d. qu'il émet des particules ionisantes nocives pour les cellules vivantes, et dégage beaucoup de chaleur. Sa radiotoxicité décroît de façon exponentielle, avant que les noyaux se stabilisent en plomb inerte, par exemple. Il faut noter toutefois que cette décroissance de la toxicité n'existe pas pour les produits chimiques très toxiques, qui ne perdent jamais leur nocivité.

La destruction des déchets nucléaires vise donc en priorité à réduire plus rapidement la radiotoxicité des transuraniens.

Grâce aux nouvelles technologies nucléaires en développement, on y parvient en exposant le plutonium et les actinides mineurs à des neutrons rapides (ou « énergétiques »), séparant ainsi le noyau de l'élément visé en deux parties, même si ce dernier ne fissionne que difficilement.

Le noyau donne ainsi deux « fragments de fission » qui perdent leur radiotoxicité en un temps relativement bref, conformément à la dynamique des produits de fission qui se trouvent normalement dans les déchets nucléaires.

Concrètement, il s'agit de mélanger les actinides mineurs (et le plutonium le cas échéant) au combustible afin que les processus de fission et de spallation, qui génèrent des neutrons rapides, puissent contribuer à faire fissionner ces éléments indésirables.

Si ce processus fonctionne dans le cas d'un combustible uranium-238/235, il est relativement peu efficace. L'utilisation du thorium permet d'augmenter la destruction des déchets de manière significative : en effet, ce combustible crée une quantité négligeable de transuraniens et, par voie de conséquence, les quantités finales (« niveau d'équilibre final ») de déchets dans le combustible se trouvent à des niveaux notablement inférieurs. Par ailleurs, la génération IV de réacteurs permet d'exploiter la quasi-totalité du combustible, ce qui n'est pas le cas des réacteurs de génération II. A puissance produite égale, les réacteurs utilisent 1 tonne de thorium (ou d'uranium-238), alors que la génération II requiert 35 tonnes d'uranium naturel enrichi à 5% d'uranium-235.

ANNEXE 7. Le retraitement des déchets nucléaires

Afin de pouvoir efficacement détruire les déchets nucléaires hautement radioactifs, il est nécessaire de pouvoir séparer les actinides du reste du combustible usagé issus des centrales utilisant des « barres » ou crayons de combustible. C'est ce que l'on appelle le retraitement.

Il faut préciser que ce retraitement ne s'applique pas à un système à sels fondus, puisque les sels, dans lesquels est dissoute la matière fissile, doivent être retraités en continu par un dispositif sur site permettant d'extraire notamment les produits de fission, plus nombreux, afin de garantir les caractéristiques physiques du fonctionnement du cœur.

Pour le retraitement de combustible « solide », un standard existe depuis 1947. Il s'agit du procédé « PUREX », pour « Plutonium Uranium Redox Extraction ». C'est un procédé aqueux, qui sert principalement à « fermer le cycle » du combustible en permettant de réutiliser l'uranium (en le ré-enrichissant) et le plutonium (en le mélangeant dans les combustibles de type MOX, constitué d'environ 8,5 % de plutonium et 91,5 % d'uranium appauvri.).

Le retraitement du combustible a également beaucoup évolué et de nombreuses variantes sont apparues, principalement par voie aqueuse (variantes de PUREX). Il existe cependant un procédé dit « pyrométallurgique » particulièrement adapté à la séparation en vue de la destruction des déchets nucléaires.

Ce procédé, développé en particulier au laboratoire national d'Argonne, aux Etats-Unis, consiste à dissoudre le combustible contenu dans un panier métallique (anode) dans des sels fondus. Un courant électrique est alors appliqué, permettant d'extraire, d'une part, l'uranium solide sur une

première cathode et d'autre part les autres actinides dans une cathode de cadmium liquide. La plupart des produits de fission restent en solution dans les sels fondus.

Ce procédé, dit « Pyro-A », est encore peu répandu, mais présente de nombreux avantages, notamment sa simplicité, sa sécurité, la possibilité de la réaliser localement et le fait que la technique est très bien comprise. La recherche se focalise actuellement sur l'amélioration du rendement de l'extraction des actinides mineurs.