

Lettre d'intention pour la création d'un

Institut des Sciences de la Fusion et de l'Instrumentation en Environnements Nucléaires

Mots clés : Fusion, Fission, Physique des Plasmas, Interactions Plasma-Paroi,
Matériaux, Capteurs, Electronique, Structures

Porteurs: Y. Marandet (PIIM) et C. Reynard-Carette (IM2NP)

Introduction

Ce projet d'Institut des Sciences de la Fusion et de l'Instrumentation en Environnements Nucléaires est impulsé par

- la présence sur le **site de Cadarache** de **grands équipements de recherche pluridisciplinaires** et de plateformes dans le domaine de l'énergie nucléaire, uniques aux niveaux européen et international dans les domaines de la **fusion** et la **fission nucléaires**, autour **d'enjeux sociétaux et économiques majeurs** sur les **questions énergétiques** : le développement d'une nouvelle filière électronucléaire basée sur la fusion, et la gestion et les évolutions de la filière fission.
- l'impact d'une **structuration de l'activité d'AMU** sur les thématiques associées à ces instruments, réparties sur 7 UMR du site (PIIM, IM2NP, LMA, M2P2, IUSTI, CPT, I2M) et développées depuis de nombreuses années en **fort partenariat avec le CEA** (Institut de la Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique IRFM et Direction de l'Energie Nucléaire DEN). En particulier, cette structuration permettra la possibilité **d'établir et faire vivre une prospective commune**, élargissant ainsi la feuille de route pour la fusion à AMU établie en 2016.
- les **synergies** que cette structuration permettra sur la base des **collaborations de longue date** entre les laboratoires d'AMU et du CEA sur ces problématiques, tant dans le domaine scientifique que dans l'utilisation des plateformes et dans la capacité à mettre en œuvre des **projets attractifs** et susceptibles d'obtenir les supports nécessaires, en particulier de par une **visibilité accrue**.
- le démarrage prévu dans la prochaine décennie de **deux nouvelles infrastructures de recherche majeures en Région PACA** pilotées dans le cadre de **consortia internationaux**, qui présentent des opportunités nouvelles qu'AMU, associée au CEA, doit se donner les moyens de saisir : **ITER**, qui doit démontrer la faisabilité **scientifique** de la fusion par confinement magnétique et fournir une preuve de principe du fonctionnement du cycle du combustible, ce qui désigne le site comme le point focal des recherches mondiales en fusion sur les 2 décennies à venir, la phase d'exploitation démarrant en 2025 pour arriver à une puissance nominale à partir de 2035 ; et le **Réacteur Jules Horowitz (RJH)**, Material Testing Reactor dont le démarrage est prévu en 2022-2023, et qui est consacré aux études des matériaux et combustibles sous irradiations pour le parc électronucléaire actuel et futur, incluant la fusion, ainsi qu'à la production de 25% à 50% des radioéléments pour la médecine et l'industrie européenne.
- une volonté partagée entre AMU et le CEA de se positionner de manière ambitieuse et adaptée sur de grands défis scientifiques. Au niveau des sciences de la fusion, il s'agit de tendre vers une position de leadership sur les aspects de physique du divertor et d'extraction de puissance, ainsi que de conforter les compétences sur la physique des plasmas en combustion. Ce positionnement constituera un tremplin essentiel pour développer les collaborations avec ITER et la participation des équipes du site à l'exploitation scientifique de la machine. Au niveau des recherches conduites dans le domaine de la fission, il s'agit de se positionner sur de nombreux enjeux liés aux réacteurs électronucléaires actuels (GEN II, GEN III+, avec en France le deuxième parc nucléaire au monde) et aux réacteurs de futures générations (GEN IV, SMRs 1), enjeux nécessitant des avancées majeures dans le domaine de la mesure, de

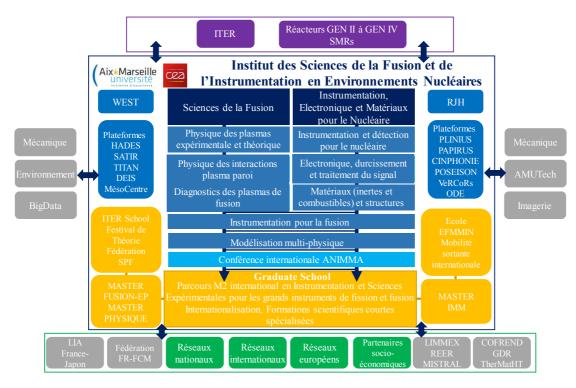
-

¹ Small Modular Reactors

la détection et des matériaux en environnements extrêmes. Enfin la production de radio-isotopes innovants à usage médical ou industriel est un enjeu important auquel l'institut cherchera à répondre.

- l'exploration de couplages entre les travaux menés en fusion et fission, dont le besoin et l'urgence sont accentués par le fait qu'ITER est la première installation nucléaire en fusion.
- la nécessité, au vu des ambitions portées au niveau de la recherche, d'une montée en puissance des formations développées dans chaque thématique, avec une internationalisation accrue allant de pair avec le caractère international des installations. Ces actions seront menées dans le cadre d'une Graduate School (GS), potentiellement renforcée par un financement EUR. Cette GS s'appuiera principalement sur des masters existants (master de Physique/master Fusion-EP pour le volet fusion et le master d'Instrumentation, Mesure et Métrologie (IMM)), et sur des réseaux tissés par ces formations à la fois dans le monde académique, le monde de l'entreprise et à l'international.

Nos ambitions s'appuient sur des bases solides en recherche et de formation, qui sont décrites dans la suite du document.



Etat des lieux

Depuis maintenant 30 ans, avec l'exploitation du tokamak Tore Supra (devenu WEST) au CEA Cadarache, les acteurs présents dans la région ont progressivement formé un tissu local d'excellence en matière de recherche et d'enseignement sur la fusion par confinement magnétique. Les collaborations ont tout d'abord donné lieu à la création de laboratoires de recherche conventionnés, qui ont ensuite évolué avec la création de la fédération de recherche sur la fusion par confinement Magnétique-ITER (FR-FCM) en 2007 regroupant à l'heure actuelle 42 partenaires. Les laboratoires mixtes AMU constituent, avec l'IRFM (Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique, CEA/DRF) le noyau dur de la fédération et concentrent la majorité des forces au niveau national. Les travaux de recherche sont menés dans un fort contexte international, dans le cadre de plusieurs projets européens, et plus largement par l'intermédiaire de collaborations avec les acteurs majeurs du domaine au niveau mondial (LIA France-Japon, accords de collaboration). Un partenariat fort existe également au niveau formation, avec une implication des personnels CEA dans l'enseignement et l'organisation commune du Festival de Théorie, ainsi que l'école d'été ITER School. En parallèle, depuis 2004, AMU (au travers des laboratoires IM2NP et LMA, ainsi que de la Filière Instrumentation du département de Physique de la Faculté des Sciences) et la Direction de l'Energie Nucléaire du CEA Cadarache intensifient des actions collaboratives pérennes en

Instrumentation, Electronique et Matériaux pour la fission nucléaire. Ces activités s'appuient sur deux laboratoires communs: LIMMEX² créé en 2010 et MISTRAL³ en cours de finalisation. Ces actions collaboratives concernent également la formation et la formation par la recherche avec en particulier un diplôme de master co-accrédité par le CEA/INSTN (parcours Instrumentation des Moyens d'Essai du Master IMM impliquant de nombreux chercheurs CEA), la création et l'organisation de la conférence internationale ANIMMA (6ème édition en 2019) et celles de l'école d'été EFMMIN (5ème édition en 2018). Ces éléments attestent d'une maturité reconnue internationalement et constituent ainsi un socle solide pour le développement des travaux de recherche de cette thématique, et leur extension à des problématiques liées à l'environnement extrême d'ITER. Ce dynamisme est accentué par l'implication dans des réseaux nationaux (GDR TherMatTH⁴, COFREND⁵), d'autres structures communes (laboratoire REER⁶ de l'IM2NP avec STMicroelectronics, structure CONCRETE avec l'IRSN et le LMA en particulier), par un fort lien avec EDF et de nombreux partenariats internationaux (MIT; nombreux centres nucléaires, instituts et universités européens; société IEEE NPSS; consortium international RJH).

Périmètre

L'institut regroupe ainsi des chercheurs et enseignants-chercheurs appartenant aux **laboratoires** universitaires suivants :

- Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM, UMR 7345)
- Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence (IM2NP, UMR 7334)
- Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA, UMR 7031)
- Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (M2P2, UMR 7340)
- Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI, UMR 7343)
- Centre de Physique Théorique (CPT, UMR 7332)
- Institut de Mathématiques de Marseille (I2M, UMR 7373)

Mais aussi issus du CEA:

- Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique (IRFM, CEA/DRF, Cadarache)
- Direction de l'Energie Nucléaire (Départements d'Etudes des Réacteurs, de Technologie Nucléaire et d'Etudes des Combustibles, Cadarache)

L'institut possédera ainsi un potentiel humain d'environ 300 personnes dont **236 permanents** et comportera une GS et deux volets de recherche :

- Volet Sciences de la Fusion (SF)

- Volet Instrumentation, Electronique et Matériaux pour le Nucléaire (IEMN)

Volet IEMN	Laboratoire	Permanents Doctorants en cours	
Correspondant	IM2NP	25	8 (dont 5 avec le CEA)
CEA/DEN:	LMA	19	8 (dont 6 avec le CEA)
A. Lyoussi	CEA/DEN	80	
	PIIM	32	14 (dont 6 avec le CEA)
Volet SF	M2P2	2	4 (dont 3 avec le CEA)
Correspondant	IUSTI	3	1
CEA/IRFM:	CPT	3	1
A. Grosman	I2M	2	3 (dont 1 avec le CEA)
	IRFM	70	28 (dont 5 avec AMU)

Sur le volet IEMN, les personnes impliquées appartiennent à deux laboratoires universitaires (IM2NP et LMA) et à trois départements de la DEN du CEA Cadarache (dont 34 déjà dans les laboratoires communs et intervenant dans le Master IMM). La constitution de ce volet repose sur des **membres investis dans différents programmes** lancés depuis 2010 qui ont bénéficié de **plusieurs guichets de financement** (FEDER, KIC INNO, Europe, ANR, PIA, Région PACA, Ville de Marseille, DGA, EDF, CEA, IRSN) en

² Laboratoire d'Instrumentation et Mesures en Milieux Extrêmes

³ Modeling, Inspection and characterization of materials and STRuctures for Advanced Low carbon energies

⁴ THERmodynamique des MATériaux à Haute Température

⁵ Confédération Française pour les Essais Non Destructifs

⁶ Radiation Effects and Electrical Reliability

particulier dans le cadre des laboratoires communs et sur de nouveaux membres du CEA du domaine pour une montée en puissance des collaborations.

Sur le volet fusion, l'IRFM est la plus grosse structure impliquée, et apporte à l'institut ses plateformes, ainsi que ses réseaux scientifiques, institutionnels et dans le monde socio-économique. Au niveau d'AMU le laboratoire PIIM concentre la majorité des ETPs, mais les personnels impliqués dans les autres laboratoires jouent un rôle clé dans la communauté (comme l'atteste le portage de projets A*MIDEX, ANR, qui impliquent plusieurs laboratoires). La participation de chercheurs issus d'équipes travaillant principalement dans des domaines autres que la fusion permet des transferts de connaissances entre les communautés. Il est par ailleurs essentiel que ces études s'appuient sur des bases solides issues des mathématiques appliquées (à la fois pour les modèles eux-mêmes et sur leur implémentation numérique), ainsi que de physique théorique. Un fort tissu collaboratif s'est ainsi tissé progressivement via des participations communes à divers projets (ANR, Europe, A*MIDEX, FR-FCM, région PACA), mais la visibilité de ce réseau n'est pas encore optimale faute d'éléments structurants locaux.

Formations

- Formation aux sciences de la fusion et des plasmas au sein du master de physique
- European Master of Science in Nuclear Fusion and Engineering Physics (Fusion-EP)
- Master Instrumentation, Mesure et Métrologie (4 parcours)
- Master Nanosciences et Nanotechnologies (NanoSciTech) en interface avec l'institut AMUTech

Ecoles Doctorales

- ED 352 Physique et Sciences de la Matière
- ED 353 Physique et Sciences pour l'ingénieur
- ED 184 Mathématiques et informatique

Structures interfaces

L'institut viendra renforcer et donner une visibilité accrue au **noyau dur** de la **fédération nationale** de recherche sur la fusion (FR-FCM, FR3029). La FR-FCM coordonne en particulier les participations des chercheurs académiques français (~150, hors CEA) au programme **Eurofusion**. Au niveau international, un **LIA avec le Japon** existe depuis 2007 et vient d'être renouvelé sous l'appellation « ITER Physics » (NIFS, Universités d'Osaka et Kyushu). Pour le volet IEMN, l'institut bénéficiera de différentes structures existantes telles que les **laboratoires et communs** AMU-CEA-CNRS déjà précités LIMMEX et MISTRAL mais également le laboratoire commun REER et la structure de recherche commune CONCRETE.

L'institut aura des interfaces avec les instituts Environnement (aspects tritium, toxicité des poussières), Big Data et Archimède (gestion et traitement des données générées par les machines de fusion et les simulations HPC), AMUTech (miniaturisation, effet des radiations) et Mécanique (lois de comportement micro-macro échelle, contrôle non destructif, matériaux, ondes ...).

Recherche

Les activités de recherche de l'institut se déclinent selon les **deux volets (SF et IEMN)** menés jusqu'ici de manière indépendante. Ces activités resteront au cœur du travail des équipes et seront soutenues par l'institut, en vue de renforcer leur **positionnement international**. Ainsi l'institut mènera de plus des **activités transverses** entre ces 2 volets, et travaillera à identifier et exploiter **les synergies**.

Recherches sur la fusion par confinement Magnétique :

L'axe directeur des activités fusion de l'institut est le développement d'une hiérarchie de modèles, permettant l'inclusion progressive des éléments de physique ab-initio et l'évaluation des incertitudes de modèles et leur prise en compte dans les comparaisons expérience/théorie. L'approche de plus haute fidélité s'appuiera sur des modélisations gyro-cinétiques et son exploitation nécessitera l'utilisation de calculateurs HPC exascale, à la pointe des possibilités technologiques. Un ensemble de modèles de niveau de fidélité moindres (fluides 3D et 2D) restent à la pointe de la recherche et seront développés également. Ces outils permettent d'aborder des verrous de la recherche en fusion (flux de chaleur et tenue des parois dans le divertor, effets des particules rapides, mode H, ELMs, disruptions) à l'orée de l'exploitation d'ITER. Le

couplage aux études expérimentales dans **WEST**, en particulier à l'aide de **diagnostics performants**, et les autres tokamaks Européens et mondiaux constitue **un tremplin idéal** vers l'exploitation d'ITER pour un de ses aspects les plus critiques. Cette démarche est en plein accord avec les recommandations du COS: « La présence à proximité d'ITER qui va devenir de plus en plus visible lorsque son exploitation aura démarré donne une opportunité unique à AMU et en particulier aux équipes impliquées dans les sciences de la fusion en raison de la proximité avec le site qu'il faudra saisir. La mise en commun des compétences complémentaires des laboratoires marseillais devrait également être soutenue, en particulier les activités communes au niveau théorique et numériques entre les laboratoires PIIM, M2P2, I2M et CPT doivent être développées et rendues plus visibles, ... ».

Les principales thématiques de recherche développées jusqu'ici sur le site en forte collaboration avec l'IRFM sont les suivantes :

- i) <u>la physique des plasmas</u> expérimentale et théorique. La physique de la turbulence et du transport turbulent et collisionnel dans les plasmas de cœur fait partie des points forts du site. Ces travaux ont été récompensés par une médaille d'argent du CNRS (X. Garbet, IRFM). Cette physique traite également d'interactions multiéchelles, entre la MHD, qui traite de la stabilité globale, et la turbulence en particulier. Les travaux sur les plasmas de bord, incluant la dynamique des barrières de transport, se sont développés plus récemment, en synergie avec le projet WEST, et ont eu un fort impact de part les techniques numériques novatrices utilisées. Ces études s'appuient sur des recherches en physique théorique (fondements des modèles), ainsi que des études mathématiques des modèles et de leur représentation numérique et bénéficie d'interactions avec la communauté plasma du site.
- ii) <u>la physique des interactions plasma paroi</u>, de l'étude des mécanismes fondamentaux à la caractérisation post-mortem de composants installés dans divers tokamaks. Les problématiques abordées concernent en particulier l'érosion des composants et la rétention du deutérium/tritium, et font appel à la fois à des méthodes expérimentales et théoriques. Cette thématique s'appuie sur des éléments forts de physique des surfaces, qui sont au cœur des problématiques de sureté.
- iii) <u>Des aspects de diagnostics des plasmas de fusion</u>, menés en lien avec les études de physique associées (diagnostics de flux de chaleur appliqués à la problématique de l'extraction de puissance, diagnostics spectroscopiques, ...), qui ont bénéficié de deux financements A*MIDEX. Cet axe de recherche est essentiel afin de pouvoir exploiter tout le potentiel scientifique de WEST.

Par ailleurs, des activités de recherche en lien avec la fusion ont été menées en **SHS** (droit, sociologie, économie) et ont fait l'objet d'une coordination par le PRII énergie. L'institut aura vocation à encourager de tels **travaux pluridisciplinaires**, essentiels dans l'optique du développement d'une **vision systémique**.

Ces recherches, menés en collaboration entre AMU/CNRS/ECM et le CEA sont fortement intégrées dans le programme européen Eurofusion (~500k€/an sur les laboratoires AMU, soit 1/3 environ du financement hors CEA national), en particulier sur les aspects fondamentaux (programme Enabling Research, 12 projets portés en commun depuis 2014) pour lesquels la France est leader dans un contexte très compétitif. L'IRFM est porteur du projet Euratom transverse TRANSAT sur le tritium et porte également le pilier fusion du centre d'excellence européen EoCoE. La communauté travaille en conséquence dans un environnement fortement international, en particulier au niveau européen, mais pas seulement (par ex. : LIA France Japon), ce qui se traduit par le fait qu'environ 65 % des publications impliquent au moins un collaborateur étranger. Le partenariat entre équipes du site s'est traduit par 11 projets ANR communs, 5 projets AMIDEX et 2 chaires, ainsi que par un flux d'environ 12 doctorants par an. L'activité scientifique se traduit par 190 publications dans des revues à comité de lecture/an en moyenne (soit environ 950 publications sur les 5 dernières années) dont 60/an pour les laboratoires AMU/CNRS/ECM. Sur ces 60 publications annuelles, 30 sont en collaboration avec l'IRFM. Ce tissu collaboratif est structuré par 35 accords de collaboration à l'IRFM⁷, et de nombreuses collaborations scientifiques au niveau des laboratoires AMU.

Recherche sur l'instrumentation, l'électronique et les matériaux pour le nucléaire (IEMN)

Les recherches menées dans le cadre du volet IEMN vont de l'instrumentation aux matériaux et correspondent à des activités déjà lancées (mais récemment pour certaines de 2010 à 2014) dans des

⁷ Incluant les grands acteurs de la fusion (Max Planck Institute Garching, UKEA, EPFL, MIT, ORNL, ...)

programmes de recherche au sein de l'IM2NP, du LMA et dans les laboratoires communs LIMMEX, REER et MISTRAL. Ces activités de recherche récentes ont donné lieu de 2013 à 2017 à une production côté AMU de 141 publications dans des revues à comité de lecture (dont 54 communes avec le CEA), de 133 actes (dont 64 communs avec le CEA), 4 brevets (dont 2 communs avec le CEA) et 43 thèses soutenues (dont 22 avec le CEA). Les recherches conduites dans ce volet cibleront les enjeux sociétaux majeurs et structurants de sureté-sécurité, de longévité des réacteurs en fonctionnement, du démantèlement des installations nucléaires en fin de vie (incluant aussi les structures de génie civil associées), de la production, de la gestion et la caractérisation avancée de déchets radioactifs ainsi que l'évolution de l'électronucléaire pour répondre à la politique de mix-énergétique de demain. Deux composantes communes à tous ces enjeux dans de tels environnements sévères et contraints (en présence de rayonnements nucléaires, de hautes températures, de fortes pressions) sont : effectuer des mesures de plus en plus performantes et poussées et proposer des avancées majeures au niveau des matériaux et structures. Il s'agira par exemple : i) d'améliorer la compréhension des phénomènes complexes couplés apparaissant lors des essais et tests sous irradiation de matériaux inertes et de combustibles pour notamment étudier leur vieillissement accéléré ; ii) de contrôler et surveiller en ligne l'intégrité de composants et de structures ; iii) de procéder à des diagnostics préalables à des opérations de maintenance ou de démantèlement ; iv) de définir, tester et valider de nouveaux concepts utilisant d'autres ressources et minimisant notamment les déchets radioactifs ; vi) de proposer de nouvelles solutions liées à la gestion de ces déchets ; vii) encore d'étudier des matériaux innovants pour des besoins autres que ceux de l'énergie de fission tels que les radioéléments à usages médicaux et des matériaux pour la fusion (ITER, DEMO).

La conception et la proposition de nouvelles mesures et moyens expérimentaux performants ainsi que de nouveaux matériaux pour des **environnements extrêmes** nécessitent une **démarche pluridisciplinaire** couplant des **compétences fondamentales** en physique, thermique, mécanique, chimie et sciences nucléaires, sciences des matériaux et des compétences plus appliquées en sciences de la mesure et en électronique mais aussi **en conduite de travaux en conditions réelles** (ou a minima représentatives) et réunissant le monde académique et des acteurs clés tels que le **CEA**, **EDF**, **et l'IRSN**.

Ce volet permettra ainsi par le regroupement ces compétences pluridisciplinaires de mener des travaux de recherche allant des aspects fondamentaux en laboratoire (interactions rayonnements matière, neutronique, photonique, détection de rayonnements, transferts thermiques, mécanique, modélisation, phénoménologie, matériaux, thermochimie/thermodynamique) jusqu'aux aspects les plus appliqués avec des études de systèmes complets innovants (capteurs/détecteurs/électronique/instrumentation, dispositifs d'irradiation, éléments de structure) en conditions réelles. Ces recherches se développent autour de 3 axes de recherche bien établis.

- i) Axe Instrumentation et détection pour le nucléaire : Cet axe portera donc sur l'étude et le développement de capteurs/microcapteurs innovants (sélectifs, miniaturisés, multi-gammes) et de dispositifs de mesure (systèmes multi-capteurs) pour la quantification en ligne des débits de dose et des grandeurs thermiques associées, pour la caractérisation de rayonnements nucléaires ou/et atomiques et pour la mesure d'autres grandeurs (concentrations de gaz de fission, élongations/déformations). Les capteurs ciblés par exemple sont : calorimètres, détecteurs SiC et diamants, dosimètres, chambres à fission et à ionisation, compteurs proportionnels, collectrons, scintillateurs. Cet axe se déclinera en études analytiques expérimentales en laboratoire, en travaux de modalisation pour le dimensionnement et l'optimisation des capteurs, et en tests et qualification de prototypes en réacteur de recherche.
- ii) Axe Electronique, durcissement et traitement du signal : Cet axe portera sur l'étude et l'analyse des effets des radiations sur l'électronique pour développer de nouvelles générations de composants électroniques miniaturisés à très haut niveau de fiabilité et durcis aux radiations, préférentiellement par des approches de type RHBD (Radiation Hardening By Design). L'accent sera mis sur le développement d'interfaces électroniques basées sur la conception de nouveaux circuits (circuits analogique BF et basse consommation) permettant le conditionnement des capteurs/détecteurs, le traitement du signal pour améliorer les performances des capteurs/détecteurs (discrimination/sélectivité, amplification, filtrage, ...). Les effets de synergie (forts flux, fortes doses cumulées, hautes températures, complexité de l'environnement radiatif en termes de composition et de spectre des particules) seront également étudiés de manière expérimentale et par modélisation-simulation intensive, notamment pour les technologies micro et optoélectroniques commerciales les plus récentes susceptibles de répondre aux performances élevées attendues.

iii) Axe Matériaux (inertes et combustibles) et structures: Cet axe concernera la conception et l'étude de nouveaux matériaux ainsi que l'étude et la caractérisation du comportement des matériaux et structures sous contraintes thermiques, mécaniques, nucléaires: i) caractérisations mécaniques et acoustiques pour la compréhension du comportement mécanique statique ou dynamique de ces derniers (du réacteur aux enceintes de confinement); ii) méthodes de contrôle et caractérisations non destructives pour l'étude et le suivi de l'intégrité des structures depuis leur mise en service jusqu'à leur démantèlement (contrôlabilité), ces techniques s'attachant à la compréhension des interactions ondes/matières, à leur modélisation et à leur mise en œuvre; iii) caractérisation de la photoluminescence (mesures de radiations, sûreté nucléaire, NRBC); iv) caractérisations thermochimiques de matériaux inorganiques jusqu'à des hautes températures (compréhension des interactions et des équilibres entre phases pour la gestion des déchets ou des accidents type LOCA); v) caractérisations et modélisations pour la compréhension de l'évolution de la microstructure des combustibles sous irradiations (phénomènes d'interactions pastilles/gaines, corrosion, gonflement).

Ce volet permettra de conduire des **travaux de recherche inter-axes** pour réaliser des études en soutien au démarrage des expériences dans le RJH et à leurs évolutions (vieillissement accéléré, comportement des matériaux et combustibles sous irradiation de conditions normales à accidentelles). Ce volet aura également pour vocation **de développer des travaux prospectifs** impulsés par les **applications médicales du RJH**, et concernant l'étude des **radioéléments innovants (diagnostiques, thérapeutiques)**: des propriétés des matériaux originels (c'est-à-dire avant intégration dans le RJH) et jusqu'à leurs traitements/préparations post-irradiatoires.

Axes de recherche transverses :

L'institut s'attachera, par exemple par l'intermédiaire de l'organisation de workshops, à mettre en place **des activités transverses** entre les deux volets, en assurant une animation scientifique sur ces thématiques (workshops, séminaires...), et en **soutenant le montage de projets transverses**. Ces actions sont en pleine cohérence avec la création d'une Graduate School commune. Deux thématiques transverses sont d'ores et déjà clairement identifiées.

Un premier axe de recherche mutualisant et croisant les compétences présentes dans les deux volets sera créé. Il portera sur l'instrumentation nucléaire pour la fusion. Il pourra comprendre des travaux en instrumentation et détection nucléaires car l'environnement d'ITER, contrairement à celui des tokamaks actuels, sera irradiant (neutrons de fusion, activation). Dans ces conditions, il devient nécessaire de mesurer les mêmes grandeurs que dans des réacteurs à fission à la fois pour la surveillance de l'opération de la machine et pour des raisons liées à la sureté. On peut citer à titre d'exemple, d'une part la mesure du débit de dose absorbée dans des matériaux utilisés en fusion et d'autre part la mesure/le contrôle des flux neutroniques au niveau de la couverture tritigène qui est primordiale en particulier pour la production du tritium in-situ. Dans ce cas, des travaux sur des détecteurs semi-conducteurs solides déjà étudiés dans le volet IEMN pourraient être accrus, et la question de la transposabilité des méthodes de mesure employées en fission va donc se poser (présence d'un champ B, vide ...) et fera l'objet de recherches spécifiques. Cet axe pourra être développé en collaboration notamment avec des partenaires actuels déjà impliqués en fission et fusion. Enfin des travaux sur d'autres capteurs et techniques de mesure pourraient compléter cet axe et être testés hors nucléaire dans la nouvelle plateforme HADES.

Un second axe transverse s'appuiera sur l'existence d'une forte composante de **simulation numérique** dans les études de fusion et de fission. Dans les deux, cas la méthodologie de comparaison simulation/expérience et de **vérification/validation** (V&V) est un point clé. Les équipes fusion possèdent par ailleurs une forte expérience HPC. Là encore la question de la **transposabilité** se pose, les problèmes et les contextes (outils académiques/industrie nucléaire) étant différents, mais l'institut commencera par établir un forum permettant d'échanger sur ces questions, et de construire une **culture commune**. Le développement d'installation nucléaire de fusion va nécessairement conduire à un rapprochement des exigences entre les deux communautés, au moins pour un certain nombre d'outils. La neutronique est par exemple très clairement une thématique de collaboration potentielle, puisqu'au-delà du fait que les problèmes de neutronique sont importants pour les machines de fusion comme ITER, la modélisation du gaz neutre (atomes, molécules) dans le plasma fait appel à des équations de transport très similaires et s'appuie sur des outils initialement développés pour la neutronique.

Formation

L'institut permettra de développer le volet formation par la recherche **en créant une Graduate School** (GS). Les besoins en termes de formation pour les 2 volets étant différents et complémentaires, cette GS s'appuiera sur les masters déjà existants :

- Les activités de physique de plasmas, interaction plasmas paroi et diagnostics requièrent une formation de physicien à dominante fondamentale et généraliste, et s'appuient donc sur le master de physique, parcours physique et plus particulièrement sur la formation « Sciences de la Fusion et des Plasmas » (SFP) dans ce parcours, ainsi que sur le European Master of Science in Nuclear Fusion and Engineering Physics (Fusion EP) coordonné par AMU depuis fin 2018 (diplôme en partenariat international crée en 2016). De même, des technologies clés de la fusion (supraconducteurs, matériaux à hauts flux thermiques, générateurs de puissance) font l'objet d'enseignements dans le cadre de ces masters, compétences que les étudiants peuvent appliquer dans d'autres domaines de recherche ou dans des entreprises. Le master est co-accrédité par l'INSTN et intégré dans la fédération nationale Formation aux Sciences des Plasmas et de la Fusion (FedSPF) réunissant actuellement 13 établissements d'enseignement répartis sur quatre sites (Île de France. Aix-Marseille, Bordeaux, Nancy). La FedSPF vise à préparer des scientifiques et ingénieurs de haut niveau, français et étrangers, notamment européens, à l'exploitation scientifique et technique d'ITER. Le rôle central joué par le site dans la formation aux sciences de la fusion des étudiants de M2 se concrétise aussi par une période de regroupement (environ 37 étudiants au total par an) à Cadarache. La spécificité du site dans le cadre de cette fédération nationale est le couplage entre les aspects de physique et de technologie des plasmas et de la fusion, grâce à l'implication des partenaires locaux ECM, ENSAM, CEA/INSTN. Cette formation est donc attractive en particulier pour des élèves ingénieurs visant un double diplôme. Tous les ans, une partie de ces diplômés continue la formation par la préparation d'une thèse et obtient ainsi la double qualification ingénieur-docteur. Les enseignements du master européen Fusion-EP sont basés sur des cours du master de physique complétés par des projets à l'international (Prague) ainsi que des cours de langue et culture française. Les étudiants effectuent leurs deux années de master dans deux universités des 5 pays partenaires (Allemagne, Belgique, France, Espagne, République Tchèque). Un projet de master conjoint s'appuyant sur Fusion-EP sera déposé dans le cadre ERASMUS+ début 2019 (P. Beyer-AMU, R. Guirlet -CEA/IRFM) Les enseignements du master de physique sont dispensés en anglais. Sur les cinq dernières années, environ 11 étudiants par an ont suivi cette formation à AMU dont 30% d'étudiants internationaux (45% en provenance de l'UE). 40% des étudiants suivent un double cursus ingénieur-Master. Sur 50 doctorants ayant commencé une thèse dans la thématique de la fusion à AMU sur la période 2013 – 2016, 14 (28%) sont issus d'une formation de Master à AMU dont 10 (70%) du master de physique. En termes d'encadrement, la communauté compte environ 60 HDR (35 à l'IRFM, 25 dans les labos AMU/CNRS/ECM).
- Depuis sa création en 1985, la Filière Instrumentation (Filière de formation de Bac+3 à Bac+5 certifiée ISO 9001 depuis 2003) du département de Physique de la Faculté des Sciences interagit avec la DEN pour proposer des formations et diplômes répondant aux besoins scientifiques et techniques du domaine du nucléaire. Ainsi le master Instrumentation, Mesure et Métrologie (120 étudiants/an) comporte 4 parcours (à coloration recherche ou professionnelle) dont un co-accrédité par le CEA/INSTN : Instrumentation des Moyens d'Essai pour le nucléaire (IME), les 3 autres étant Microcapteurs et Systèmes de Détection, Ingénierie en Instrumentation Industrielle, Commercialisation en Instrumentation Scientifique. Ce master, unique en France par sa thématique et ses caractéristiques, accessible par les voies de la formation initiale, l'apprentissage, la formation continue ou la VAE implique 16 intervenants CEA effectuant plus de 200 h d'enseignements en sciences et technologies nucléaires. Ce master bénéficie d'un partenariat fort également avec EDF (cible de l'accord cadre AMU-EDF) se traduisant par des bourses d'excellence, des visites d'installations, des interventions, des stagiaires/apprentis. Le master IME a formé plus de 250 diplômés depuis sa création en 2004 qui se sont insérés de façon excellente soit après une poursuite en thèse soit par l'accès à un emploi (majoritairement en lien avec la filière nucléaire) directement à l'issue de la formation avec un taux moyen de 90 % à 18 mois sur les 10 dernières années. L'équipe du master accentue actuellement le volet internationalisation par sa participation à la co-organisation d'EFMMIN et d'ANIMMA ainsi que par le développement de la mobilité internationale sortante en valorisant son réseau en recherche et en formation dont le Nuclear Reactor Laboratory du Département Nuclear Science and Engineering du MIT (projet MOBIL-APP déposé à AMIDEX, AAP Académie d'Excellence, en partenariat avec le CEA, EDF, MIT, JSI, NCBJ, CNESTEN, SCK-CEN).

La GS a pour objectif global de **renforcer l'attractivité internationale** des formations dans le périmètre de l'institut, en particulier au niveau master, par l'établissement de nouveaux partenariats⁸ ou la mutualisation de partenariats existants⁹. La GS s'appuiera sur des masters complémentaires, aussi bien au niveau des formations proposées que des débouchés, visant à la fois les laboratoires académiques/CEA et le secteur privé industriel. Cet environnement sera mis à profit pour permettre aux étudiants d'acquérir une vision systémique des filières fusion et fission. Les actions suivantes seront engagées à la fois au niveau master et doctorat :

Master:

i) le développement d'un parcours international de M2 à coloration recherche, au sein du master IMM, dédié à l'instrumentation, la physique expérimentale, l'électronique, et la mesure pour les grands instruments dans le domaine de la fission et la fusion. Ce parcours de M2 en anglais d'un volume horaire de ~230 heures pourra avoir des modules mutualisés avec les autres parcours du master IMM (dont IME et MSD) et du master européen FUSION-EP, nécessitera des visites de grands instruments en France et/ou à l'étranger (RJH, ITER, WEST, RHF de l'ILL, ESS, BR2, MARIA) et des plateformes associées, comportera une UE Projet de recherche qui pourra être réalisé en « alternance » au sein des laboratoires impliqués dans l'Institut et UE Stage obligatoire en particulier dans les laboratoires de l'Institut et du CEA, dans les grands instruments nationaux et internationaux, ainsi que dans les plateformes et équipements associés à cet institut.

ii) **renforcer le caractère international** de la formation SFP au sein du Master physique, en parallèle de la montée en puissance du master européen FUSION-EP, qui de par sa construction (étudiants répartis sur 5 sites) ne sera pas suffisant pour atteindre l'objectif d'une vingtaine d'étudiants par an, cohérent avec la capacité de formation doctorale du site. Ces masters ont en effet vocation à former des physiciens avec une solide base fondamentale, et apporter en complément une formation aux sciences et technologies de la fusion. Des modules pourront être mutualisés avec le parcours international IMM décrit ci-dessus.

La GS visera également à augmenter la mobilité internationale sortante des étudiants des Masters, en collaboration avec EDF et des universités et centres de recherche partenaires. Débouchés visés : Doctorats dans les laboratoires d'AMU et du CEA, dans les infrastructures de gestion des grands instruments, Ingénieurs d'études et de recherche dans les institutions précitées ou leur sous-traitants.

- <u>Doctorat</u>: le développement de **programmes de formation courte** sur mesure **de haut niveau** (en cohérence avec l'action dédiée du **Schéma Directeur de l'Offre de Formation**) en anglais destinées tout particulièrement aux doctorants (mais ouvertes aussi aux chercheurs et aux professionnels), répondant aux besoins des équipes de recherche ou des entreprises d'innovation. Ces programmes seront associés à des séminaires scientifiques faisant intervenir des experts reconnus au niveau international.

Par ailleurs, la GS aura vocation à **étendre des actions existantes** telles que les écoles d'été (EFMMIN, ITER school, festival de théorie) en y associant les doctorants mais aussi à **collaborer** avec le CEA dans le cadre de **l'école du Sodium et des Métaux Liquides** et **l'école FJOH** Frédéric Joliot et Otto Hahn.

La GS pourra **être renforcée par une EUR**, qui permettra de développer des actions plus ambitieuses (financement de stages de master à l'international, de projets de recherche en laboratoire, de visites d'installations, de thèses –, de séminaires en invitant des scientifiques et experts nationaux et internationaux, d'événements permettant l'immersion des étudiants de master, d'écoles d'été,...). Le positionnement sera ajusté en fonction du cadrage de l'appel EUR.

Plateformes technologiques

Les activités expérimentales et numériques s'appuieront sur différents moyens expérimentaux disponibles dans les laboratoires universitaires et sur le site de Cadarache. **Outre les grands instruments** présents sur le

9

⁸ parmi lesquels MepHI, SkolTech, USTC Heifei, Assam Science and Technology University, Universités d'Osaka et Kyushu, Université de Lancaster

⁹ MIT, JSI, NCBJ, CNESTEN, SCK-CEN

site de Cadarache (ITER, WEST et le RJH), le CEA héberge également d'une part à l'IRFM un ensemble de plateformes dédiées à des tests ou des qualifications de composants (HADES, SATIR), les systèmes de chauffages (TITAN, DEIS), et d'autre part dans les départements de la DEN des plateformes fission : PLINIUS (sureté, accidents graves), CINPHONIE (caractérisation de colis de déchets radioactifs) par combinaisons de techniques de mesures innovantes), POSEIDON (Thermohydraulique), PAPIRUS (technologies sodium), mais aussi un atelier de fabrication de chambres à fission, et des laboratoires chauds (LECA STAR). Les activités de l'institut s'appuieront également sur les moyens expérimentaux des laboratoires AMU impliqués et sur ceux des laboratoires communs (LIMMEX, REER, MISTRAL) ainsi que sur des plateformes AMU à vocation plus large, comme le Mésocentre de calcul pour le développement des codes massivement parallèles et pour la production sur des codes moins lourds, ou le CP2M pour les analyses de surface de composants. Les partenariats avec EDF et l'IRSN rendront également possibles l'accès aux les plateformes VeRCoRs (EDF, maquette d'une double enceinte de confinement à l'échelle 1/3 qui peut être mise en pression afin de simuler son cycle de vie) et ODE (IRSN, ensemble de 64 corps d'épreuve en béton de type centrale de 8 m³ subissant des pathologies qui sont modélisés en termes de vieillissement, matériaux qui sont suivis et contrôlés par CND entre autres dans le temps, dans le cadre du projet ODOBA).

Relations avec le monde socio-économique et culturel

Les relations avec le **monde socio-économique** seront **amplifiées et diversifiées** afin de maintenir une très bonne insertion professionnelle de bac + 5 à bac+ 8 dans les domaines de la recherche, de la R&D et de l'industrie. Ceci sera effectué avec des partenaires aux niveaux national et régional déjà impliqués tels que :

- **EDF**: impliqué au niveau de la formation par la recherche à bac+ 8 avec des bourses CEA/EDF et des thèses dont des contrats CIFRE, à bac+5 par l'intermédiaire de bourses d'excellence attribuées annuellement à des étudiants du parcours IME pour des stages dans le domaine de l'énergie nucléaire et à l'international (centres nucléaires polonais NCBJ, marocain CNESTEN et le MIT), par le partenariat pour la mobilité sortante internationale, au niveau de la formation par l'accueil de stagiaires et apprentis, par des visites d'installations, par des interventions sous forme de conférences et enfin par le recrutement de diplômés (sur 10 ans en direct chez EDF: 10 stagiaires, 10 alternants et 8 embauches en CDI dans le domaine de l'instrumentation par exemple sans compter les intégrations chez ses nombreux partenaires et sous-traitants). Nous avons reçu un accord de principe du Délégué Emploi RH EDF PACA pour une lettre de soutien qui nous parviendra à la suite de la transmission de cette lettre d'intention.
- IRSN: Cet établissement public d'expertise et de recherche sur les risques nucléaires et radiologiques regroupe sur son site de Cadarache plus de 200 chercheurs dans les domaines de l'environnement et de la recherche en sureté. Les recherches sur les matériaux concernent les programmes sur le combustible, le confinement et le vieillissement des structures nucléaires. Dans le domaine des matériaux, l'IRSN et AMU ont déjà lancé en commun un certain nombre de collaborations, comme par exemple dans le génie civil avec les recherches menées en commun avec le LMA sur la plate-forme ODE (observatoire de la durabilité des bétons) de Cadarache ou sur les interactions plasma paroi en béryllium dans ITER. Les intérêts communs en matière de R&D et de formation entre l'institut et de l'IRSN permettront de développer et renforcer ces collaborations.
- Les membres du conseil de perfectionnement de la Filière Instrumentation composé de représentants de 29 entreprises¹⁰, d'un du CEA, d'un de l'INSTN, d'un de l'Union Patronale Régionale PACA, du responsable Emploi Formation MEDEF PACA, d'un représentant du CFA Epure Méditerranée et d'un de l'APEC, des responsables de formations de la Filière et des directeurs de laboratoire.

Et les partenaires internationaux associés ou en liaison avec les consortiums des grands instruments (ITER, RJH), les entreprises impliquées dans l'ingénierie et la construction des machines puis leur maintenance, leur équipement, leur qualification.

_

¹⁰ dont CEA, EDF, TECHNICATOME, IRSN, Naval Group, Airbus Helicopters, IPSEN, TOTAL, SNEF, SNEF Technologies, Arcelormittal, EXTIA, APAVE, SOFRESUD, SOFRESID, AUXITEC, EKIUM, Société du canal de Provence, SBM Offshore...

Rôle prospectif et structurant

L'institut aura pour rôle de :

- Soutenir les activités de recherche de chacun des volets afin de renforcer leur positionnement sur la scène internationale. Pour les sciences de la fusion, il s'agit de poursuivre la stratégie de focalisation sur deux grands enjeux pour la fusion, la physique de l'extraction de puissance et des plasmas en combustion, en vue de l'exploitation d'ITER en accord avec la feuille de route établie en 2016. Cette feuille de route s'appuie sur trois piliers: Science, Technologie et Sureté et sera révisée sur une base régulière. Concernant le volet IEMN, il s'agit de regrouper et valoriser des compétences scientifiques pluridisciplinaires déjà reconnues à l'échelle nationale et internationale en instrumentation et mesure, en électronique, en sciences nucléaires, en matériaux, en mécanique et contrôles non destructifs pour le nucléaire afin de conduire des travaux de recherche compétitifs et de haut niveau pour répondre à des enjeux sociétaux liés à la filière nucléaire; et de développer une forte synergie avec les équipes associées au RJH.
- Renforcer l'attractivité du site (étudiants, doctorants, chercheurs) en améliorant la visibilité/lisibilité des réseaux de collaborations existant et de la richesse de l'environnement scientifique. Ces actions sont nécessaires afin de tirer au maximum profit de la présence de grandes plateformes au CEA Cadarache et de l'arrivée de nouvelles plateformes de niveau international (ITER, RJH) dans la décennie à venir.
- **Mettre en lumière les collaborations AMU/CEA** en définissant une politique de signature commune pour les publications.
- Renforcer les liens formation recherche et l'internationalisation des filières par la création d'une GS, permettant également d'exploiter et de développer les complémentarités des formations existantes relevant du périmètre de l'institut.
- Exploiter et développer les **synergies entre les activités fusion et fission du site**. Développer de manière volontariste une vision systémique de la fusion sur le site, impliquant les SHS.
- Prospecter et faire **émerger de nouvelles activités** de recherche sur les radioéléments à usage médical.

Modalités de pilotage

Le modèle de gouvernance sera calqué sur celui des EURs, et adapté à la structure de l'institut :

- Un comité de pilotage veillant à la cohérence des actions de recherche et formation de l'institut avec la politique de site. Ce comité sera constitué de représentants institutionnels des tutelles impliqués (AMU, CEA, CNRS, ECM), et contribuera à résoudre toutes difficultés entre partenaires dans la réalisation des objectifs de l'Institut. Le comité de pilotage peut constituer des comités d'experts internationaux indépendants pour le conseiller sur les aspects de stratégie scientifique.
- Un comité directeur destiné à entériner les objectifs annuels en termes de recherche et de formation, recevoir le reporting annuel de l'équipe de direction, faciliter la mobilisation des ressources nécessaires à la réalisation des objectifs. Le comité directeur sera constitué des directeurs des laboratoires impliqués, d'un représentant de la direction de l'IRFM et d'un représentant de la DEN du CEA, d'un représentant de la FR-FCM, des vice-doyens chargés de la recherche et de la formation de la Faculté des Sciences, du directeur du département de physique de cette Faculté, des directeurs des écoles doctorales impliquées, et des responsables des masters impliqués.

Le comité directeur lance l'appel à candidatures pour le poste de directeur, chercheur ou enseignantchercheur d'envergure scientifique reconnue dans les UMR du périmètre de l'Institut, et propose au comité de pilotage **une équipe de direction**. Cette équipe de direction pourra être constituée d'un directeur, de deux directeurs adjoints recherche (issus de chaque volet) et deux directeurs adjoints (idem) chargé de la GS.

Institut des sciences de la fusion et de l'instrumentation en environnements nucléaires ISFIN

Yannick MARANDET (PIIM) et Christelle REYNARD-CARETTE (IM2NP)

Réponses aux recommandations du board international

Recommandations synthétiques

Des opportunités majeures avec la présence en région de deux plateformes internationales (ITER & Jules Horowitz), ainsi que des organisations nationales et européennes reconnues depuis de longues dates (Fédération de Recherche Fusion par Confinement Magnétique - FR FCM -, Programmes Européens dédiés...), qui doivent être prises en compte dans le projet d'institut, ainsi que le contexte (inter)national sur la transition énergétique.

1. Le projet d'institut doit être repensé dans ce contexte national de transition énergétique en prenant en compte les enjeux sociétaux, notamment sur le thème du nucléaire

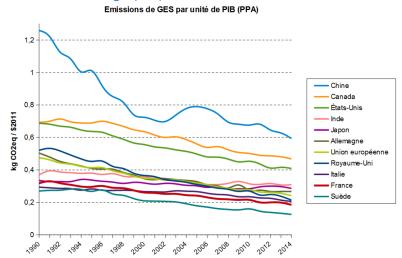
Un projet ambitieux et à fort impact sociétal en phase avec le contexte de transition énergétique

L'institut permettra aux partenaires du site d'afficher une ambition commune sur la problématique de la production d'énergie décarbonée et centralisée, pour laquelle le nucléaire joue un rôle clé sur la plan national et permet à la France d'être l'un des pays où la production d'électricité est la moins CO2 intensive. Les questions clés concernent l'évolution à moyen et long termes de la part du nucléaire dans le mix énergétique (l'objectif national étant 50% à l'horizon 2035, la question du renouvellement du parc des centrales électronucléaires se posant dans les années à venir), dans un contexte où la production globale d'électricité devrait croître pour accompagner la décarbonation de secteurs économiques s'appuyant à l'heure actuelle fortement sur les énergies fossiles (transport, habitat). Dans ce contexte de bouleversements majeurs, l'institut contribuera à apporter des réponses scientifiques à certains des défis posés par la transition énergétique (durée de vie des centrales actuelles par l'étude du vieillissement des matériaux, en particulier dans le réacteur RJH, démantèlement des installations en fin de vie) et travaillera à préparer la mise au point de l'énergie de fusion thermonucléaire aux côtés du projet international ITER et des réseaux nationaux (FRFCM) et européens. L'institut tirera partie des ressources du site pour porter une approche interdisciplinaire de ces questions techniques, intégrant les dimensions sociétales qui y sont intimement associées (droit, sociologie, ...), en lien avec les instituts travaillant sur des thématiques connexes. Ces enjeux scientifiques sont adossés à des défis économiques et industriels majeurs, et l'institut travaillera en lien étroit avec les acteurs industriels concernés à identifier les nouveaux besoins en termes de formation, en s'appuyant sur des acteurs comme l'agence ITER France et le pôle Capenergies.

Ces défis économiques et industriels s'inscrivent dans le contexte plus large de la transition énergétique, contexte que nous précisons ci-dessous.

La transition énergétique en France, un rééquilibrage mais des opportunités majeures pour les équipes du site.

En France, la lutte contre le réchauffement climatique (induit par la production de gaz à effet de serre dont environ 70% résulte de la consommation d'énergies fossiles au niveau mondial) s'est traduite par la mise en place d'une Stratégie Nationale Bas-Carbone, et plus spécifiquement dans le domaine énergétique par la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE).



Sources: Émissions de gaz à effet de serre hors UTCATF (CCNUCC – sauf Chine et Inde: WRI/CAIT) et PIB en \$ PPA internationaux constants de 2011 (Banque Mondiale).

Actuellement parmi les pays développés, la France est l'un des pays les moins carbonés grâce notamment à son programme électronucléaire important développé après le choc pétrolier de 1973 qui a conduit entre 1970 et 1999 à la mise en service de 58 réacteurs nucléaires sur 19 sites assurant ainsi 71,6 % de la part d'électricité nucléaire dans le mix électrique en 2017. Dans le cadre de la PPE, la France s'est fixée des objectifs pour réduire les émissions des gaz à effet de serre jusqu'à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 (c'est-à-dire zéro émissions). Pour y parvenir, la PPE prévoit une montée en puissance très importante des moyens de production s'appuyant sur des énergies renouvelables intermittentes, une disparition progressive des sources d'énergie fossile carbonées, et une réduction de la part du nucléaire de fission à 50% d'ici 2035. Ceci implique l'arrêt de 14 réacteurs nucléaires d'ici à 2035¹. Cependant, la PPE identifie un certain nombre de points de vigilances et de recommandations pour le secteur nucléaire français. Ainsi la PPE stipule la nécessité de

- o préserver une capacité de construction de nouveaux réacteurs nucléaires appuyés sur une technologie et des capacités industrielles nationales (expertises, R&D)
- o n'aboutir à l'arrêt complet d'aucun site nucléaire 2
- o conserver la fermeture du cycle de combustible nucléaire en définissant et soutenant « un programme de R&D gardant en vue un éventuel déploiement industriel à l'horizon de la 2ème moitié du 21ème siècle d'un parc de réacteurs à neutrons rapides », mais aussi préserver la stratégie de traitement-recyclage du combustible nucléaire sur la période de la PPE et au-delà, jusqu'à l'horizon des années 2040 (moxage d'un certain nombre de réacteurs 1300 MW, multirecyclage des combustibles dans les réacteurs du parc actuel).
- d'engager la réalisation d'études jalonnées d'avant-projets d'ici la prochaine révision de la PPE permettant de mieux évaluer le potentiel des technologies de SMR (Small Modular Reactor) et de développer les compétences associées (sous réserve de résultats concluants sur les études de concept français qui seront rendus en 2019)

¹ dont les deux plus vieux réacteurs d'ici 2023 (Fessenheim-1, Fessenheim-2) en application du plafonnement de la puissance électronucléaire installée, et pour permettre la mise en service de l'EPR de Flamanville.

² sauf exceptions, en particulier liées à l'âge des installations (e.g. : Fessenheim).

o de structurer la filière de démantèlement

Par ailleurs, la PPE stipule que l'arrêt des réacteurs dépendra d'actions conduites en Europe, ainsi l'arrêt de deux réacteurs d'ici 2025-2026 (autres que Fessemheim-1 et -2) pourra avoir lieu uniquement : « si le critère de sécurité d'approvisionnement est respecté et si nos voisins européens accélèrent leur transition énergétique, réduisent leurs capacités de production à partir du charbon et développent massivement les énergies renouvelables, et que cela devait conduire à des prix bas de l'électricité sur les marchés européens, susceptibles de dégrader la rentabilité de la prolongation des réacteurs existants ».

Aux réacteurs de l'industrie du nucléaire est associé un grand nombre de réacteurs de recherche de différents types. En Europe, les Material Testing Reactors sont vieillissants et seront dans les prochaines années remplacés par le réacteur Jules Horowitz en cours de construction sur Cadarache.

A l'étranger, une politique de développement vigoureuse de la filière du nucléaire est appliquée dans plusieurs pays. 450 réacteurs nucléaires sont actuellement en opération et une cinquantaine sont en construction à l'échelle mondiale (en Turquie, en Russie, en Biélorussie, en Chine, aux Eméritats Arabes Unis, au Bangladesh, en Inde, ...) et plus de 140 sont planifiés.

L'agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit également 1100 Milliards de dollars d'investissements dans l'énergie nucléaire d'ici 2040, permettant d'augmenter la production d'énergie nucléaire mondiale d'environ 46%.

Par ailleurs, plusieurs concepts de SMR sont investigués par différents pays tels que les Etats-Unis (plusieurs dizaines d'entreprises privées impliquées), le Canada et l'Argentine.

Au delà de la (première) transition énergétique : l'énergie de fusion

Les échelles de temps concernant l'énergie de fusion vont au-delà de la transition énergétique actuelle. En effet les résultats d'ITER sont attendus d'ici à 2040, et l'Europe comme ses partenaires internationaux se sont fixés comme objectif de mettre sur le réseau de l'électricité de fusion à l'horizon de la décennie 2050 (Démonstrateur DEMO), avec un déploiement industriel sur la seconde moitié de ce siècle (sur un calendrier similaire à celui envisagé avec les réacteurs à neutrons rapides). Avec la présence d'ITER, le site d'Aix-Marseille Cadarache est donc au cœur de cette aventure pour les 20 prochaines années, aventure qui contribuera à répondre aux défis majeurs qui se dessinent pour la seconde partie du siècle : augmentation de la population mondiale, concentration des populations dans des mégalopoles, contexte de lutte contre les dérèglements climatiques et d'adaptation des sociétés, électrification massive des secteurs du transport et de l'habitat.

2. Renforcer la valorisation des thématiques qui différencient le site, ainsi que leur soutenabilité, durabilité : pour la fusion thermonucléaire apport & spécificité du site par rapport à la FR FCM, pour la fission nucléaire, positionnement et force du site par rapport aux grands centres nationaux

Sciences de la fusion

La FR-FCM coordonne les activités de recherche au niveau national, et constitue l'interface avec le programme européen sous EURATOM. Tous les acteurs de l'institut sont membres de la FR-FCM, et les UMR de physique/mécanique impliquées dans l'institut font partie de la fédération, à la fois à travers des projets portés par la fédération et des participations au programme européen Eurofusion. L'institut regroupe l'ensemble des forces en présence sur le site, qui représentent 1/3 des effectifs académiques au niveau national (1/2 en comptant le CEA), sous une même bannière. La présence d'installations de niveau international (WEST puis ITER) à Cadarache donnent naturellement au site un rôle central au niveau national,

et une visibilité internationale importante. Les équipes du site sont principalement positionnées sur trois des cinq grandes thématiques de la fédération (soit turbulence et transport dans les plasmas de bord et interactions plasma paroi, turbulence et transport dans les plasmas de coeur). Le site concentre en effet 70% des effectifs permanents hors CEA (75% en comptant les non permanents) dans les thématiques d'interaction plasma paroi et physique des zones périphériques du plasma, et 40% des effectifs permanents sur la thématique de turbulence et transport dans les plasmas de cœur (50% avec les non permanents). Les thématiques matériaux et systèmes de chauffage ne sont que très marginalement représentées (hors CEA). Les mathématiques appliquées, bien que représentées sur le site et bien intégrées, ne constituent également qu'une faible fraction des effectifs au niveau national. Cette analyse montre donc clairement que le site a une forte identité thématique, pour lequel il est un acteur clé à l'échelle internationale. Ceci se traduit par exemple par rôle important dans les projets qui préfigurent une action majeure de soutien aux actions de théorie/simulation/vérification/validation qu'Eurofusion travaille à mettre en place sur le prochain plan cadre. Les équipes du site pilotent ainsi l'un des trois projets sur la modélisation des plasmas de bord (impliquant l'EPFL, IPP Garching, CCFE Culham, ...), et ont joué un rôle moteur dans les deux autres projets financés sur cette thématique. Ces projets, couplés à l'opération de WEST, seule machine européenne capable d'étudier les interactions plasma paroi sur des temps pertinents pour ITER, visent à développer les outils qui seront utilisés pour préparer et interpréter les décharges d'ITER. Les actions menées ces 5 dernières années ont d'ores et déjà conduit à mettre en place des licences pour deux outils de simulation qui seront distribués par ITER, et feront l'objet de collaborations avec la Chine. Ils constituent donc un élément clé du positionnement des équipes en vue d'une participation efficace à l'opération d'ITER. Ces actions sont cohérentes avec les projets financés par A*MIDEX (projet émergence innovation). L'institut veillera également à accompagner la montée en puissance des aspects nucléaires de la fusion, ITER étant la première machine de fusion classée comme INB (installation nucléaire de base). Les efforts porteront en particulier sur la couverture tritigène et l' instrumentation associée, en lien étroit avec le CEA/DEN sur le centre de Cadarache. Ces activités pourront permettre d'obtenir des financements F4E (Fusion for Energy). Enfin, l'institut veillera à construire une réelle interdisplinarité sur le site, en fournissant un cadre encourageant une implication accrue des SHS sur les thématiques de l'institut, la fusion constituant de plus une spécificité locale forte.

Ces thématiques sont bien entendues liées à des défis importants auxquels la communauté fusion est confrontée pour l'opération d'ITER, qui donne un horizon de 15 à 20 ans (les composants face au plasma seront installés en 2027 et la phase nucléaire d'ITER débutera en 2035). Elles s'inscrivent ainsi de manière claire dans la feuille de route Européenne vers l'électricité de fusion.

Instrumentation en environnements nucléaires

Depuis de nombreuses années les UMR du site ainsi que la Filière Instrumentation ont construit un partenariat fort avec le centre de Cadarache du CEA dans le domaine de la fission en ciblant des thématiques majeures pour répondre à des enjeux liés à l'industrie nucléaire d'aujourd'hui et du futur à moyen et long termes et pour répondre à des besoins impulsés par le projet du Réacteur Jules Horowitz qui démarrera en 2023 et remplacera les autres MTR européens dans le futur.

Les thématiques majeures en recherche sont :

- l'instrumentation et la détection nucléaire (de l'élément sensible du capteur/microcapteur/détecteur jusqu'au durcissement de l'électronique)
- la caractérisation de matériaux et structures incluant un volet de contrôle non destructif

Ces thématiques de recherche regroupent 45 membres de deux UMR (IM2NP et LMA) et 80 membres du CEA (Direction de l'Energie Nucléaire, 3 départements DER, DEC, DTN). Ces deux thématiques majeures ont acquis une renommée ces dix dernières années grâce à une structuration commune entre les UMR et le CEA, leur conférant un positionnement national et international. A titre d'exemple de structuration nous pouvons rappeler :

- le laboratoire commun LIMMEX créé en 2010, faisant l'objet d'une convention tripartite AMU-CEA-CNRS 2018-2024 et dédié à l'Instrumentation et la Mesure en Milieux EXtrêmes. Laboratoire unique à l'échelle nationale. Il n'a tout d'abord comporté que des programmes de recherche en support aux Réacteurs de recherche en Fission (ZPR, MTR: Réacteur Jules Horowitz), et a été étendu en 2018 au domaine de la fusion. La mesure d'énergie déposée par interaction rayonnement matière constitue un point fort de ce laboratoire. Le laboratoire possède un leardship au niveau international par rapport à des travaux de recherche conduits par d'autres centres nucléaires tels que le NCBJ, le SCK-CEN et JSI. Ce positionnement est dû à l'approche complète développée couplant travaux expérimentaux et numériques en conditions de laboratoire et en conditions réelles en réacteurs de recherche, et aux moyens expérimentaux conçus à façon ces dernières années. Ainsi AMU et le CEA, outre une activité de publication commune, a déposé deux brevets relatifs à des cellules calorimétriques compactes et à des détecteurs semiconducteurs SiC dopés au Bore.
- la conférence internationale ANIMMA biennale créée conjointement entre AMU et le CEA en 2009 impliquant la société savante internationale IEEE NPSS, le centre nucléaire Belge SCK-CEN et maintenant l'Institut Slovène Josef Stefan (JSI). Cette conférence possède à l'échelle internationale la particularité de traiter de l'instrumentation dans plusieurs domaines (physique fondamentale, fusion, réacteurs de recherche, réacteurs de puissance, environnements, médicine, démantèlement, cycles, sécurité, sûreté, éducation) contrairement à d'autres conférences plus spécialisées telles que IEEE NSS-MIC.
- plus récemment, le laboratoire commun MISTRAL (Modeling, Inspection and characterization of materials and STRuctures for Advanced Low carbon energie) (AMU-CEA-CNRS-ECM) créé cette année (et qui définit une partie de notre interface avec l'institut de mécanique).

Ces thématiques bénéficient de la complémentarité des équipes en termes de compétences et du potentiel expérimental exceptionnel du centre de Cadarache, les rendant incontournables au niveau national et très compétitives au niveau international. Les laboratoires du site associés à l'Institut possèdent des compétences scientifiques permettant de conduire des travaux expérimentaux et de modélisation numérique de haut niveau à caractère fondamental impliquant différentes disciplines telles que la physique, la mécanique, la thermodynamique, l'acoustique, l'électronique, la microélectronique, les matériaux ...

De plus, le centre de Cadarache est le centre de recherche du CEA dédié aux études sur les énergies décarbonnées : fission (de Gen II à Gen IV), fusion, solaire, biomasse (2ème et 3ème générations). Outre cette spécificité, il se différencie des autres centres par l'accueil de nombreux moyens expérimentaux lourds/majeurs tels que les réacteurs expérimentaux de fission et de fusion, des plateformes et des installations expérimentales ainsi que des laboratoires accrédités. Au fil des années, les moyens expérimentaux liés à la fission nucléaire ont été regroupés en Région PACA. Ainsi le futur réacteur d'irradiations RJH impliquant un consortium international, et remplaçant en France le Material Testing Reactor OSIRIS basé à Saclay et arrêté fin 2015 et à terme les MTR Européens vieillissants, est en cours de construction sur Cadarache. Le centre de Cadarache abrite des plateformes expérimentales de recherche uniques en Europe (voire au monde) pour les études liées aux accidents graves (Plinius2, Verdon...), des installations en actifs pour les études sur les combustibles irradiés et matériaux activés, (LECA), des installations expérimentales dédiées aux études et recherches pour les réacteurs de future génération, des laboratoires et installations expérimentales d'expertise nationale pour les super-contrôles dédiés aux colis de déchets radioactifs, à leur caractérisation radiologique et physique (installation Chicade) comprenant des équipements tels que des générateurs de neutrons, des accélérateurs d'électrons, des tomographes gamma. Il accueille également le réacteur CABRI pour des études liées à la sûreté. Par conséquent, avec ces moyens expérimentaux, le centre de Cadarache se différentie des autres centres de recherche par les travaux scientifiques et les études technologiques conduits pour les besoins des études des réacteurs, du combustible, de sureté et pour le contrôle NRBC par mesures nucléaires non-destructives.

3. L'institut doit développer sa vision, son ambition à moyen terme au regard de son environnement exceptionnel

L'institut vise à réaliser pleinement les potentialités du site liées à l'arrivée de deux installations majeures qui vont lui donner un rôle unique au monde dans la fusion et l'instrumentation nucléaire. Réaliser ce potentiel passe par l'ambition de se positionner comme leader sur des thématiques clés sur lesquelles le site est déjà bien impliqué, en s'appuyant d'abord sur les réseaux européens puis mondiaux. Atteindre ces objectifs nécessitera un pilotage actif et une activité soutenue de prospective permettant d'ajuster le positionnement et d'anticiper les inflexions scientifiques et l'évolution du contexte (à titre exemple, les modalités d'exploitation d'ITER sont encore en construction et les opportunités de collaboration avec les équipes du site vont fortement augmenter avec le passage dans la phase d'exploitation).

Un « **advisory committee** » sera mis en place pour conseiller le comité de pilotage sur les orientations stratégiques de l'institut.

L'environnement de l'institut va fortement évoluer à moyen terme, avec le démarrage du RJH en 2022/2023, le premier plasma d'ITER fin 2025 puis à plus long terme le passage en phase nucléaire (opération en deutérium/tritium) en 2035. Cependant, il est à noter que des flux neutroniques substantiels seront produits dès le début de l'opération en deutérium, et que par conséquent les aspects nucléaires seront bien présents dès 2030. Plus largement, l'institut évoluera bien entendu en phase avec les changements liés à la transition énergétique.

Les grands objectifs de l'institut sont naturellement construits en cohérence avec ce calendrier, et se situent en partie dans la continuité des actions actuelles, mais visent également à tirer partie des synergies entre les compétences fusion et fission pour se positionner sur de nouvelles thématiques à l'interface.

A l'horizon de **5 ans**, les objectifs sont donc les suivants :

Recherche:

- piloter le développement des outils européens de simulation numérique pour les plasmas de bord, progresser dans le développement des outils nécessaires à la simulation des plasmas en combustion. Ces deux aspects s'appuient fortement sur notre positionnement actuel dans le programme européen Eurofusion, et sur une intégration réussie dans le schéma de financement ambitieux de ces activités actuellement en cours de mise en place pour le prolongement d'Eurofusion dans Horizon Europe.
- s'intégrer pleinement dans les activités sur les modules de couverture tritigènes (TBM), en renforçant les collaborations IRFM/DEN/AMU sur cette thématique et en particulier sur l'instrumentation nucléaire. Le CEA est à l'heure actuelle déjà positionné sur ces activités, mais le potentiel de montée en puissance sur cette technologie clé de la fusion est important.
- proposer et qualifier de l'instrumentation innovante (miniaturisation et rupture technologique) pour des mesures en ligne dans le RJH et contribuant à un positionnement concurrentiel de ce MTR par rapport à ceux toujours en fonctionnement en Europe, en s'appuyant sur les actions en cours.
- formaliser un accord avec le Nuclear Reactor Laboratory du MIT, en s'appuyant sur le projet CALOR-I d'AMIDEX

- développer des modèles et outils numériques (notamment en couplant les trois échelles macro/méso/micro), et des outils expérimentaux (CND, SHM, Thermochimie) pour comprendre, prédire, contrôler le comportement de structures et de matériaux et de défauts dans la continuité des recherches actuellement menées et en les étendant à la fusion
- tirer partie de l'implication des SHS sur les thématiques de l'institut, pour construire des projets véritablement inter-disciplinaires.

- Formation

- Promotions de 20 étudiants sur les thématiques plasmas de fusion (Master Européen FUSION-EP renforcé par le programme "Erasmus Mundus Joint Master Degree", poids accru dans le réseau national FedSPF Fédération formation aux sciences des plasmas et de la fusion, formation SFP au sein du master de physique), avec un noyau d'étudiants internationaux.
- création et montée en puissance du parcours international d'instrumentation des grandes installations nucléaires dans le master IMM (~12 étudiants) avec l'intervention de personnalités internationales dont issues du MIT
- mettre en place les éléments de formation pluridisciplinaires au niveau de la Graduate School, aussi bien au niveau master que doctorat, en s'appuyant sur une approche d'« apprentissage par problème » (Etude de cas en groupes pluridisciplinaires), en particulier en lien avec le master de droit de l'énergie. Cette approche pourra aussi faire l'objet d'actions communes avec d'autres instituts impliqués sur des thématiques connexes.
- Renforcer et articuler entre elles les écoles d'été dans le périmètre de la Graduate School: Festival de Théorie, ITER School, EFMMIN. Introduire dans l'Ecole EFMMIN une thématique sur l'instrumentation nucléaire pour les grands instruments en fission et fusion, introduction de thèmes liés au nucléaire pour l'ITER School.

- Aspects Socio-économiques

- mettre en place une politique scientifique avec EDF et l'IRSN pour définir des sujets de thèses d'intérêt commun et leur financement (par ex. Eurofusion pour l'IRSN, dans la continuité des actions en cours).
- créer et faire fonctionner la cellule « Progrès Scientifique et Technologique »

A l'horizon de 10 ans, au niveau recherche, nous visons à :

- l'intégration de nos outils de simulations dans le système d'ITER, et à une participation active à la préparation et l'analyse des expériences s'appuyant sur la maîtrise de ces outils, et l'expertise acquise avec l'opération de WEST.
- devenir un acteur incontournable de l'instrumentation des modules tests de couverture tritigènes d'ITER, être positionné sur cette technologie pour DEMO et/ou CFETR en Chine.
 - concevoir de nouveaux dispositifs d'irradiations et l'instrumentation associée pour conduire de nouvelles expériences dans le Réacteur Jules Horowitz
 - être bien positionné sur les problématiques liées au démantèlement
 - proposer des modèles incertains pertinents appliqués au comportement de structures, et développer

les méthodes numériques permettant de prendre en compte cette nouvelle dimension en préservant des coûts de calcul raisonnables

Au niveau de la formation, nous visons à positionner le site comme le hub européen visible à l'international sur les thématiques de fusion et d'instrumentation nucléaire dans toutes leurs dimensions, aussi bien techniques que sociétales. Il s'agit de développer une attractivité permettant d'attirer un noyau d'étudiants internationaux brillants, aussi bien par la qualité de la formation proposée que par les liens établis avec le CEA, ITER-IO et plus largement le monde socio-économique, via l'Agence ITER France et le pôle Capenergies en particulier.

4. Répondre aux remarques pour chaque thèmes (recherche, formation...)

Les réponses aux différentes remarques sont détaillées dans la suite.

Formation

1- Dans le contexte national sur le thème de la transition énergétique, le programme de la Graduate School doit être construit suivant une approche très interdisciplinaire et sociétale

Au delà des aspects scientifiques et techniques qui constituent la base de la formation des étudiants de la Graduate School, le contexte national et international de transition énergétique requiert en effet de porter une attention particulière aux aspects sociétaux, et nécessite de construire une approche interdisciplinaire. Il est en effet important de former les étudiants aux aspects sociétaux des énergies nucléaires, mais aussi et de manière plus ambitieuse de les informer – voire de les associer - aux réflexions/recherches menées sur ces thématiques dans le cadre des SHS. De même il est important que des étudiants d'autres masters (droit de l'énergie, environnement, sociologie ...) puissent être exposés à certains aspects scientifiques et techniques dans le domaine de la Graduate School. Ce type d'approche permettra par exemple de conférer à ces étudiants un rôle de facilitateurs/interfaces entre leurs futurs employeurs (grandes collectivités, établissements d'enseignement supérieur, ...) et des acteurs industriels. Un autre aspect important concerne les questions d'inter-culturalité, puisque les étudiants formés ont vocation à s'insérer dans des activités de recherche/R&D autour de grandes installations internationales.

De manière concrète, la Graduate School proposera une unité d'enseignements, mutualisée entre les différents parcours des masters de la GS (Master IMM, Master fusion-EP, formation SPF au sein du master physique), intitulée « nucléaire et société » comportant des séminaires traitant d'un même sujet par différentes communautés (Sciences, SHS). Ces enseignements concerneront à la fois le master et le doctorat. Ils porteront sur des aspects du nucléaire (controverses, cycle des déchets, construction de scénarios énergétiques, prolifération, applications médicales, production de radioélements...) et seront assurés en lien avec l'INSTN et le CEA pour la partie « sciences et techniques » - mais bénéficieront également d'un éclairage par des intervenants SHS et industriels.

De plus, le nouveau parcours international du Master IMM relatif à l'instrumentation et aux sciences expérimentales pour les grands instruments du nucléaire qui sera créé à court terme dans la GS, assurera une formation aux aspects liés à l'interculturalité et la négociation internationale (Unité d'enseignement dédiée), auxquels ses étudiants pourront être fortement exposés. Nous avons d'ores et déjà un accord de principe d'Anne-Marie LIENART de la Faculté des Arts, Lettres, Langues et Sciences humaines (coresponsable du Master Études Européennes et Internationales et responsable de son parcours Négociation internationale et interculturelle (MASNI), Laboratoire LEST) pour travailler sur le choix et la

définition de modules dédiés aux cultures, interculturalité et négociation internationale et constituer une équipe d'enseignants et intervenants extérieurs (notamment des diplômés du parcours MASNI). Nous avons également l'expression de l'intérêt de Jane Dunphy (Senior Lecturer, director of MIT's English Language Studies program, School of Humanities, Arts, and Social Sciences, Department of Global Studies & Languages, MIT) pour réaliser des séminaires et/ou workshops dans ce parcours. Un certain nombre de sujets d'intérêt ont été identifiés avec Mme Dunphy:

- (Inter)cultural Intelligence: What Every Professional Needs to Know
- Cultural Patterns & Variability: Communicating Effectively in the Global Workplace
- Communication Strategies for Intercultural Teamwork
- Designing and Delivering Effective Sponsor Talks
- Global Writers-Global Readers
- Less is More: Style and Substance in Writing up Research
- Strategic Communication: The Case of the Abstract

Cette unité d'enseignements ainsi que ces séminaires/workshops seront également ouverts aux étudiants des autres parcours des masters de la GS et à ses doctorants et post-doctorants.

Au-delà de ce travail visant à élargir la vision des étudiants de la Graduate School, celle-ci mettra en place des projets pluridisciplinaires (« apprentissage par problèmes »), sur lesquels travailleront en équipe des étudiants de la GS et des étudiants d'autres masters (droit, sociologie, environnement, ...)., en particulier du Master de sciences humaines et sociales, mention sociologie, et du parcours « droit de l'énergie » du master droit international et droit européen. Ce dernier fait l'objet d'une convention de partenariat avec l'INSTN, offre une formation de haut niveau sur les problématiques juridiques liées à l'exploitation et l'utilisation de l'énergie répondant aux besoins de la recherche et des industries de l'énergie. Ce parcours permet d'appréhender le droit de l'énergie sous tous ses aspects (droit européen, international et interne, droit public/droit privé, couvrant l'ensemble des filières énergétiques : électricité, gaz, nucléaire, énergies fossiles et énergies renouvelables), tout en le combinant à une ouverture pluridisciplinaire offrant des éclairages économiques, géopolitiques et financiers. Le parcours compte 32h d'enseignement en droit du nucléaire, essentiellement assuré par des enseignants du CEA via l'INSTN. Sans affecter directement le parcours "droit de l'énergie", la Gradutate School servira d'interface et de facilitateur sur les aspects pluri-disciplinaires pertinents (ex. : visites de sites tels que le chantier ITER, le réacteur RJH, éclairage scientifique à destination des étudiants de droit...).

Ces projets pourront être construits de façon commune avec les autres instituts impliqués sur des thématiques connexes (transition environnementales, imagerie pour la biologie et la médecine, sociétés en mutations, ...)

2- L'institut doit être pouvoir identifier les nouveaux métiers et mettre en place les cursus "professionnalisant" pour former les futurs étudiants

Le contexte général de transition énergétique décrit précédemment, avec un rééquilibrage de la place du nucléaire en France à l'horizon 2035, va nécessairement induire des mutations en matière de métiers et d'emploi. De même, la finalisation de la construction d'ITER et du RJH puis leur exploitation donnera lieu à des évolutions de métiers qu'il convient d'anticiper. L'institut évoluera dans le contexte socio-économique « macroscopique » de la filière nucléaire en France, pour laquelle un travail de prospective nationale est mené de façon régulière. De même, l'agence ITER France (AIF), en charge des engagements français pris dans le cadre traité ITER, a une mission de développement économique du territoire et effectue en particulier un travail de prospective sur la question de l'évolution des métiers. L'institut devra donc mettre en place des partenariats permettant de s'intégrer dans ces réflexions (création d'un

Conseil stratégique Emploi Formation), d'en extraire les points pertinents pour son champ d'action, et d'impulser les évolutions nécessaires au niveau de la formation. Dans ce qui suit, nous commençons par donner des éléments globaux résultant de ces travaux de perspectives, afin d'illustrer le propos.

Un contexte général : des besoins de recrutement très importants dans un secteur nucléaire en mutation

Le rapport du 19 février 2019 de Laurence Parizot, missionnée par le gouvernement pour le plan de programmation des emplois et des compétences dans le cadre de la Transition Énergétique et Écologique, fait état du fait que l'industrie nucléaire constitue le plus gros pourvoyeur de la filière électrique avec au total 220 000 emplois (ETP) directs et indirects (étude réalisée par le Comité Stratégique de la Filière Nucléaire en 2014, et corroborée par l'Union Française de l'Électricité en 2017).

EMPLOIS DIRECTS ET INDIRECTS RECONSTITUES

	EDF DPI	CYCLE	CEA	DCNS+TA	ING/CONSTR	TOTAL
NORMANDIE	7299	10352		1588	9120	28359
HAUTS DE FRANCE	5486	4125			950	10561
CENTRE VAL DE LOIRE	8600	2850			3800	15250
ILE DE FRANCE	35000	7500	2400	750	13300	58950
GRAND EST	6000	1500			3800	11300
BOURGOGNE FRANCHE - COMTE	4000	0			5700	9500
AUVERGNE RHONE ALPES	18800	12000			6270	37070
PACA	5000	5775	4000	750	2660	18185
OCCITANIE	2500	3000	4000		3800	13300
NOUVELLE AQUITAINE	4000	2250				6250
PAYS DE LA LOIRE	800	750				1550
BRETAGNE					950	950
TOTAL FRANCE	97485	50102	10400	3088	50350	211225

(Rapport PARIZOT 2019 : SFEN, PriceWaterhouseCoopers 2011 - Le poids socio-économique de l'électronucléaire en France, Comité Stratégique de la Filière Nucléaire 2016 - Cartographie de la filière nucléaire française, EDF DPI 2016 - Empreinte emplois 2015 de la production et ingénierie)

La répartition de ces emplois dans les principaux secteurs et par région montre notamment que 18 000 emplois sont concernés en région Sud Provence Alpes Côte d'Azur. De plus l'emploi du nucléaire bénéficie d'une grande dynamique sur la décennie actuelle avec 8 000 emplois à pourvoir chaque année à tous les niveaux et sur tous les métiers concernés (SFEN – Nucléaire et Sociétés, 12/11/2018). Ces recrutements permettent de palier les départs à la retraite de la génération des « bâtisseurs » de l'électronucléaire et sont nécessaires face aux projets en cours et ceux à venir ; on citera notamment le programme actuel d'EDF « Grand Carénage » de maintenance des 32 réacteurs 900 MW du parc français. Même si une baisse des emplois liés aux centrales nucléaires en France est attendue à l'horizon 2030, les installations toujours en exploitation, les nouvelles installations (notamment l'EPR) et la filière du démantèlement la compenseraient en partie, en la ramenant à moins de 7%. Au niveau Européen, la filière nucléaire correspond aujourd'hui à 800 000 emplois ; si les projets de construction de réacteurs décrits plus haut voient le jour, ce nombre pourrait être augmenté de 350 000, ce qui constitue un vivier conséquent de postes durables. Le maintien en fonctionnement des centrales nucléaires en toute

sécurité, le démantèlement et la gestion des déchets radioactifs nécessitent de pouvoir recruter de la main d'œuvre qualifiée de très haut niveau. Former et recruter des cadres dans les métiers très variés du nucléaire constitue un véritable enjeu d'autant que les entreprises et structures demandeuses du secteur (EDF, Orano, CEA, TechnicAtome, ...) considèrent la situation comme critique.

A l'échelle de l'institut : prospective sur les métiers et réactivité des formations

Afin d'identifier auprès des organismes et entreprises du nucléaire leurs besoins en termes d'acquisition et de développement de compétences dans le domaine et les thématiques majeures de l'institut, il est prévu de mettre en place un COnseil Stratégique Emploi-Formation (COSEF). Sa mission sera notamment d'identifier et d'anticiper les mutations professionnelles dans le cadre du champ d'activité de l'institut et de faire des propositions d'évolution ou de création de nouveaux diplômes ou formations courtes / sur mesure pour s'adapter aux nouveaux emplois, anticiper et accompagner la reconversion des entreprises et territoires impactés. Le chantier d'ITER impliquera par exemple des changements d'échelles entrainant de nouveaux besoins en matière de support technique et logistique au sens large. Ce comité comportera des industriels sélectionnés pour leur rôle stratégique d'envergure dans la filière nucléaire, leur implication dans des technologies fusion (en particulier ITER), ou leur place de spécialistes en instrumentation et mesure: EDF, IRSN, SNEF, ORANO, TechnicAtome, ONET-Comex nucléaire, CAEN, Thermocoax, RMD tech, Assystem, Mirion, SETARAM, SPIE nucléaire, Bertin Technologie, CNIM ... Il comportera aussi des représentants de sociétés savantes telles que IEEE NPSS, SFEN, ENEN et des fédérations et branches professionnelles (MEDEF, Syntec, UIMM, APEC, ...), et enfin du pôle CAPENERGIES et de l'agence ITER France (AIF). L'AIF anime en particulier le réseau C2I (Comité Industriel ITER), dont le rôle est de faciliter les partenariats en informant les entreprises de l'avancement du projet, et de renvoyer une information fiable, anticipée et adaptée aux industriels français avec le point d'orgue des IBF (Iter Business Forum).

Pour répondre aux besoins ainsi identifiés, l'institut pourra :

- s'appuyer sur plusieurs diplômes à coloration professionnelle permettant de couvrir un spectre large d'activités en instrumentation (étude et ingénierie en instrumentation, contrôle-commande, acquisition, métrologie, moyens d'essai, commercialisation d'instrumentation scientifique) et à coloration recherche (microcapteurs et systèmes de détection, fusion, physique du plasma, instrumentation pour les grands instruments)
- concevoir des formations courtes sur mesure comme déjà effectué pour des métiers en tension et pour plusieurs niveaux
- continuer à pratiquer la Validation des Acquis de l'Expérience afin que des salariés puissent notamment se repositionner dans le secteur du nucléaire ou dans un autre secteur du fait de la transversalité de l'instrumentation.

Recherche

1- Identifier les thématiques majeures

Le projet d'institut est construit sur deux piliers, la physique des plasmas de fusion par confinement magnétique et l'instrumentation nucléaire qui est une thématique transverse fusion/fission. L'institut permettra ainsi de positionner le site sur des grands enjeux liés à la transition énergétique dans le domaine du nucléaire. Les travaux conduits permettront ainsi à la fois de conserver/accroître une

expertise dans le domaine de la fission nucléaire (instrumentation, caractérisation, CND) et de la physique des plasmas de fusion mais aussi de se positionner sur la nucléarisation de la fusion, à l'œuvre dans le projet ITER qui est la première installation de fusion à être considérée comme une INB (Installation nucléaire de base). Dans la suite nous explicitons donc les thématiques majeures de ces deux piliers, ainsi que les nouvelles thématiques à l'interface que cette structuration permet d'aborder. La question de l'instrumentation nucléaire en fusion est évidemment centrale, en particulier pour les éléments permettant de tester la régénération du tritium, mais de part son périmètre l'institut sera également naturellement bien positionné sur des questions liées à la gestion des déchets et au démantèlement des installations de fusion.

En ce qui concerne les plasmas de fusion thermonucléaire, l'institut fera porter ses efforts sur deux des grands enjeux de physique et de technologie d'ITER :

- i) la physique des interactions plasma paroi au sens large, incluant la physique des plasmas de « bord »
- ii) le confinement et la stabilité des plasmas en combustion, i.e. en présence de particules alpha suprathermiques résultant des réactions de fusion.

Ces deux thématiques s'appuient bien entendu sur des aspects de diagnostics des plasmas (mesures de flux thermiques sur les parois, spectroscopie, ...). Le tokamak WEST, clairement dédié aux aspects liés aux interactions plasma paroi sur des durées longues, donne une visibilité internationale particulière au site, qui regroupe 70% (hors CEA) des permanents sur cette thématique au niveau national (80% incluant le CEA). Les études menées sur ces thématiques vont de la compréhension des mécanismes fondamentaux à l'œuvre dans les interactions plasma paroi, aussi bien du point de vue expérimental que celui théorique, à la modélisation numérique de la turbulence dans les zones périphériques des plasmas. La seconde thématique regroupe 40% des permanents au niveau national (hors CEA, 80% incluant le CEA) et est appelée à se développer dans les 10 années à venir (les expériences pertinentes sur ITER auront lieu dans la phase nucléaire, qui commencera en 2035).

Les aspects de calcul numérique HPC sont essentiels pour ces deux thématiques, et les équipes impliquées possèdent une compétence reconnue dans le domaine (le code GYSELA étant par exemple l'un des codes utilisés pour tester les nouveaux supercalculateurs). La taille des simulations nécessaires pour répondre aux questions physiques pertinentes a nécessité de développer des approches innovantes. Un aspect novateur actuellement exploré concerne par exemple le développement des techniques d'intelligence artificielle visant à accélérer les simulations HPC et permettre un stockage et une exploitation optimisée des résultats de simulation, en se focalisant sur les données pertinentes pour l'analyse physique. En effet, les volumes de données brutes produits par de telles simulations sont tels qu'ils peuvent être très difficiles à exploiter sans prétraitement. De plus, certains des outils numériques développés pour la fusion vont être amenés à contribuer à des études de sureté, en lien avec l'IRSN, ce qui va rendre nécessaire un travail approfondi sur la quantification des incertitudes. L'expertise acquise par le CEA/DEN sur ces questions en fission sera précieuse.

Du point de vue technologique, le point clé est l'implication du site dans le développement d'éléments de couverture tritigène pour ITER (et DEMO), permettant le renouvellement du tritium par réaction des neutrons de fusion sur du Lithium. La démonstration de ces technologies est une des missions clé d'ITER, qui testera des maquettes très fortement instrumentées (mesures de doses, échauffement ...), basées sur l'utilisation de métaux liquides. Il existe donc des synergies très importantes avec les études menées sur GENIV (sodium liquide). Cette thématique est relativement nouvelle sur le site, en phase avec le développement de ces éléments qui seront testés pendant la phase nucléaire (après 2035), mais appelée

à monter fortement en puissance dans les années à venir. De manière plus générale, l'instrumentation nucléaire concerne également la structure de la machine, pour laquelle il est essentiel de caractériser les doses reçues (et donc le vieillissement).

En ce qui concerne l'instrumentation et la caractérisation en environnements nucléaires, les thématiques majeures sont :

- l'instrumentation et la détection nucléaire (de l'élément sensible du capteur/microcapteur/détecteur jusqu'au durcissement de l'électronique)
- la caractérisation de matériaux et structures incluant un volet de contrôle non destructif

Ces thématiques initialement développées dans le cadre de la fission, seront étendues le cas échéant à la fusion, en sont en phase avec les demandes de l'Autorité de Sureté du Nucléaire (ASN). Celles-ci imposent trois défis pour la sureté nucléaire et la radioprotection : anticiper afin de prendre en compte les délais longs de validation dans le nucléaire, maintenir des marges de sureté et mobiliser la filière nucléaire pour maintenir et développer les compétences. Le développement de nouvelles instrumentations, de nouveaux matériaux, et de nouvelles méthodes de caractérisations doit conduire à faire des mesures en temps réels dans des conditions sévères. Celles-ci permettront d'une part d'appuyer les recherches théoriques et expérimentales du comportement de la structure, du matériau et du combustible et d'autre part de faire le suivi et l'évaluation de paramètres clés et de chaque élément de la chaine de production d'énergie. Les objectifs des deux thématiques sont parfaitement intégrés à ces attentes avec notamment le contrôle, la maitrise, la prédiction du comportement et du vieillissement des installations, la maîtrise des opérations de maintenance et la gestion des déchets dans le cadre du démantèlement par exemple. Le Réacteur Jules Horowitz par sa capacité expérimentale exceptionnelle (conditions expérimentales, et nombres d'expériences simultanées) constituera un outil précieux pour les avancées dans ces domaines (vieillissement accéléré de matériaux, comportements de combustibles sous irradiations, études en conditions normales, incidentelles et accidentelles).

Les travaux cibleront ainsi:

• La conception de capteur/détecteur/électronique pour la mesure en ligne en réacteur (de recherche notamment) et le contrôle de paramètres clés

Pour la Fission

La mesure en ligne de paramètres physiques, thermiques, nucléaires est capitale dans trois cas de figures. Le premier cas de figures correspond à de la qualification des canaux expérimentaux préliminairement à l'intégration d'expériences afin d'être en mesure de fournir les conditions expérimentales soit pour le dimensionnement d'expériences pour les scientifiques, soit pour le choix du canal par les clients. Le second cas de figures concerne l'instrumentation des expériences embarquées (dispositifs d'irradiations) dédiées aux études du vieillissement accéléré des matériaux et du comportement des combustibles sous irradiation. L'intégration de nouveaux capteurs et de détecteurs permettrait de suivre des grandeurs clés en temps réel contribuant une meilleure compréhension des phénomènes complexes couplés (et non post-irradiation avec une information intégrée). Le troisième cas de figures porte sur le contrôle des éléments de structures du réacteur pour suivre leur vieillissement.

Quel que soit le cas de figures, les enjeux scientifiques résident dans le fait de proposer des capteurs et détecteurs de plus en plus miniaturisés (microcapteurs, rupture technologique), de plus en plus performants malgré des conditions extrêmes accrues (en termes de caractéristiques métrologiques, en

termes de durcissement aux rayonnements nucléaires) ainsi que des systèmes multi-capteurs redondants, sélectifs, multi-physiques. Ces travaux demandent une approche complète couplant à la fois des activités expérimentales en conditions de laboratoire pour les phases de conception et d'études et d'étalonnage avec le développement de banc d'études ad hoc à façon et en conditions réelles avec des qualifications lors de campagnes d'irradiations et à la fois des travaux de modélisations couplés (thermique, électronique, interactions rayonnement-matière).

Pour la Fusion

Dans la phase nucléaire d'ITER (à partir de 2030), différentes grandeurs similaires à celles présentes en réacteur de fission (flux, activation, dose et débit de dose, échauffement nucléaire, dpa) devront être quantifiées dans d'autres conditions et environnements (radiations, température élevée, champ magnétique). A titre d'exemple, on peut citer les besoins en termes de mesure de flux neutroniques. En effet, il sera nécessaire d'effectuer une surveillance continue de ces flux pour contrôler la production de tritium dans les TBM (couverture tritigène) qui conditionneront le maintien de la réaction deutérium-tritium et donc du processus de fusion/plasma. La mesure du rendement en neutrons étant effectuée sur le lieu de production du tritium, de nouvelles contraintes/conditions sont à considérer pour le développement de nouveaux détecteurs (semi-conducteurs par exemple). Un autre enjeu réside également dans la mesure de l'énergie déposée par interactions rayonnement matière. De nouveaux détecteurs miniaturisés en local pourraient supplanter des mesures basées sur des bilans enthalpiques globaux.

Prédiction et interprétation de comportements

La réalisation, l'amélioration de modèles associés à différents éléments au sein des réacteurs (matériaux, fluide) sont capitales pour prédire, interpréter et comprendre des phénomènes et ainsi apporter des réponses dans le cadre de la sûreté de fonctionnement, la gestion des accidents, la longévité, et la conception de nouveaux systèmes ...

L'institut mènera des travaux sur :

- le développement de modèles et outils numériques pour le comportement de réseaux périodiques de tubes flexibles sous écoulement
- le couplage des trois échelles macro/méso/micro dans le cas par exemple du contact grille/gaine pour déterminer plus précisément le comportement global (assemblage sous écoulement fluide) de la structure et le comportement local (endommagement de la gaine via ses interactions avec la pastille et ses interactions au niveau des grilles maintenant les crayons de combustible)
- la modélisation des écoulements (diphasiques, en déséquilibre de vitesses et température, bouillants) soit pour des situations accidentelles (débits critiques au niveau de brèches, temps de dépressurisation du cœur du réacteur, crise d'ébullition), soit pour un fonctionnement optimal (flux critiques, régimes)
- la modélisation de la combustion du sodium avec l'eau liquide, sujet important pour les réacteurs de 4eme génération ainsi que le démantèlement des réacteurs anciens
- la détermination de données thermochimiques expérimentales (des fonctions thermodynamiques, diagrammes de phases), sur des systèmes chimiques mal connus (soussystèmes clés, binaires et/ou ternaires, des systèmes complets toujours multiconstitués et multiphasés et comprenant un très grand nombre d'éléments) qui sont nécessaires dans la prédiction des conséquences éventuelles lors d'accidents nucléaires graves avec fusion du cœur (intégration dans des modélisations complètes des sous-systèmes concernés).

• Contrôle de structures/enceintes/ouvrages/pièces

Les Evaluations Non Destructives développées en laboratoire sont transférées vers des mesures sur les enceintes appliquées en Génie Civil à travers le PIA ENDE. Un axe de développement important pour les années à venir est leur capacité à caractériser les matériaux et à détecter les défauts. Trois verrous importants existent à ce jour. L'institut y travaillera dessus :

- la détection de la position des zones endommagées dans une structure de grandes dimensions (enceintes de confinement, conteneur de stockage de déchets radioactifs) par analyse modale linéaire et non linéaire
- La quantification des pathologies développées à cœur sur ces zones identifiées par la mise en œuvre des techniques linéaires et non linéaires (très sensibles) pour générer des cartographies 3D de l'état de santé du matériau
- le suivi en temps réel des ouvrages s'appuyant sur les bruits naturels ou industriels pour analyser régulièrement le comportement de la structure et détecter des déviances. Le Structural Health Monitoring, en plein essor en France et à l'international, nécessite le développement d'instrumentation spécifique fiabilisé dans le temps voire pour certains dans un environnement radioactif conséquent.

Dans la perspective de la phase opérationnelle d'ITER (fin 2025) et de sa sûreté de fonctionnement un axe stratégique pour le CND (Contrôle Non Destructif) et le SHM (Structural health monitoring) est de proposer des méthodes de contrôle et de surveillance pendant la phase d'opération. L'objectif est de développer une méthode exploitant les ultrasons laser qui permet le contrôle sans interrompre le vide dans la chambre à vide. Cette méthode permet aussi de faire un contrôle sans risquer de polluer le plasma. Une première étape consistera à montrer la faisabilité de détecter les endommagements recherchés avec une source laser. Une deuxième étape consistera à développer un outil spécifique comme l'IVVS (In-Vessel Viewing System) qui est un système robotisé 3D permettant l'inspection visuelle. La dernière étape consistera à valider le diagnostic en condition opérationnelle. Un tel développement offrira aussi de nouvelles perspectives pour le CND en service des réacteurs de fission.

Gestion des déchets, en particulier dans le cadre du démantèlement

Avec le début de démantèlement des centrales nucléaires les plus anciennes, les flux de déchets, leur diversité et les problématiques liées à leur traitement et leur stockage vont prendre une importance croissante. Le système chimique constitué des produits de fission issus des combustibles usés et des additifs de vitrification compte plus d'une quarantaine d'éléments. Suivant la composition des déchets et des matrices vitreuses de confinement, des phénomènes complexes comme des séparations de phases dans le liquide verrier ou le verre, la précipitation de phases cristallines de diverses natures, sont susceptibles de se produire et d'affecter à la fois le procédé de vitrification et la durabilité des colis de déchets. Ainsi, l'étude thermodynamique de nombreux systèmes chimiques encore mal connus mettant en jeu ces produits de fission ainsi que l'étude thermodynamique des verres sont indispensables pour une analyse fine et une compréhension de ces phénomènes. Du point de vue expérimental, de nombreuses données thermodynamiques manquantes devront être déterminées et des avancées en termes de modélisations thermodynamiques des verres borosilicatés seront à mener. De plus, les équipes de l'institut s'intéresseront également aux spécificités des déchets issus des installations de fusion, qui ne produisent pas des déchets à très longue durée de vie, mais par contre produisent des déchets tritiés. Ce point est en interface avec le projet d'institut sur la transition environnementale

(projet H2020 TRANSAT), et est bien évidemment d'intérêt pour l'IRSN également.

2- Préciser la répartition des Enseignant-chercheurs/chercheurs par thématiques majeures

La répartition des Enseignants-Chercheurs/chercheurs par thématiques est précisée dans le tableau cidessous.

Thématique	ETP (UMR AMU/CNRS/ECM)	ETP (CEA)
Interactions plasma paroi	26 dont 5 CNRS et 1 ECM	39
Plasmas en combustion	18 dont 5 CNRS	25
Instrumentation et détection nucléaire	20 dont 1 CNRS	55
Matériaux, structures	25 dont 5 CNRS et 3 ECM	25
Sciences Humaines et Sociales	4	-
Total	93	144

Intégrer dès à présent les SHS dans le projet

Au niveau recherche, deux unités SHS du site (LAMES, DICE) ont rejoint le périmètre de l'institut (cf. courriers en annexe). Pour chacune de ces unités, le nombre de permanents concernés est limité (4 en tout), mais leur participation s'appuie sur des chercheurs/enseignants chercheurs bien identifiés, qui ont travaillé sur des thématiques liées à l'énergie, et plus particulièrement l'énergie nucléaire, au sein du PR2II énergie. L'institut fournira un cadre stable dans lequel inscrire ces recherches, ainsi qu'un soutien permettant le développement de ces thématiques et leur intégration dans des projets pluridisciplinaires et/ou interdisciplinaire, à l'échelle de 5 à 10 ans. Ce travail de construction de projets communs s'appuiera également fortement sur la formation par la recherche. L'expérience d'enseignement en « apprentissage par problème » qui avait été montée pour le parcours nucléaire du Master énergie en 2012 s'est en effet révélée très positive : cela faisait se rencontrer des chercheurs de mondes différents (disciplines, institutions...) dans l'accompagnement d'étudiants eux-mêmes issus de mondes différents (école d'ingénieur, université dans différentes disciplines). Les complémentarités de regard se sont avérées centrales, pensées par les enseignants en amont et amplifiées dans la pratique du voisinage.

La prise en compte d'une dimension SHS dans la Graduate School a été décrite dans le paragraphe formation. Celle-ci intègre également une dimension sur l'interculturalité, dimension qui a donné lieu à plusieurs colloques conjointement organisés par AMU et l'Agence ITER France (AIF), et qui sont à l'interface avec les thématiques de l'institut Méditerranéen pour la transition environnementale.

Les thématiques de recherche développées dans le cadre de cet institut sont présentées ci-dessous, cette liste n'ayant pas vocation à être exhaustive.

L'UMR DICE développe un axe de recherche « Droit, Science et Technique ». Les mutations énergétiques font partie des thématiques étudiées dans cet axe de recherche, dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire portée par le PR2I Energie. Les chercheurs/enseignants chercheurs de DICE pourraient contribuer aux activités de l'institut sur les questions touchant aux aspects juridiques de la transition énergétique, incluant la réglementation des activités nucléaires, la réglementation applicable aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique.

Des chercheurs du LAMES sont impliqués de longue date dans des programmes touchant aux questions nucléaires dont certains peuvent bénéficier à l'institut, notamment dans l'analyse des liens entre les installations nucléaires et leur territoire d'implantation et dans l'analyse des conditions de l'innovation de long terme dans ce secteur à haute technologie et à investissements considérables. D'autres peuvent gagner à être renforcés par un dialogue avec les sciences et techniques, comme autour des questions à enjeux de sécurité industrielle (place de l'homme dans l'organisation du travail de pilotage des installations, d'entretien et de démantèlement) ou des questions d'impacts sanitaires et environnementaux (exposition radiologique, déchets...). L'UMR LAMES est à l'heure actuelle impliquée dans plusieurs projets autour de questions liées au nucléaire (NUXELO, Nucléaire et Société Locale ; METROPOLITIN Métrologie politique des déchets industriels en Europe, TREPENCA Territoire de la Production d'Energie non carbonée). Le projet NUXELO s'appuie sur la projection d'archives d'un feuilleton romanesque produit dans les années 1960 à l'occasion de l'installation du centre de Cadarache à des personnes ayant été confrontées à cette arrivée du nucléaire sur leur territoire, afin de susciter des récits allant au delà de simples représentations abstraites ou du recyclage plus ou moins conscient de discours prêt à penser sur le sujet. Le projet Metropolitin, financé dans le cadre du PIA3 s'intéresse en particulier à la question des déchets à très faible activité (TFA) issu du démantèlement des installations de fission. La gestion de ces produits de démantèlement constitue ainsi un enjeu fort et crée une pression sur les filières de valorisation de ces matières et sur la capacité des installations de stockage pour ceux qui sont rangés dans la catégorie institutionnelle de déchets ultimes TFA. Le projet propose d'interroger le rôle de l'information dans la catégorisation et dans la gestion de ces déchets : comment l'information sur les déchets de démantèlement, par essence extrêmement divers, est-elle actuellement produite, mise en circulation, utilisée, comprise ou contestée ? Comment les déchets sont-ils mesurés, qualifiés, normalisés, investis de valeur et pratiqués par les différents acteurs de la filière du démantèlement ? Le projet TREPENCA a été conçu dans une perspective socio-historique et comparative entre France et Italie vise à éclairer certaines dynamiques sociales autour des enjeux énergétiques en Europe méridionale. Ce faisant, il questionne plus largement les relations entre établissements industriels et territoires environnants. Le LAMES a également été impliqué dans le projet interdisciplinaire PASSIVITER financé par A*MIDEX sur les aspects de sureté nucléaire liés à la production de poussières dans les installations de fusion.

Innovation

Une cellule "Progrès Scientifique et Technologique" doit être créée afin de valoriser vers la société l'ensemble des travaux scientifiques

Une cellule "Progrès Scientifique et Technologique" sera créée durant la première année d'existence de l'institut. Cette cellule aura deux missions principales i) effectuer une veille scientifique et initier/accompagner les transferts de spin-offs de recherches scientifiques et technologiques vers l'industrie (en lien avec le réseau européen FUTTA2 par exemple³) ii) assurer un rôle de communication

³ Fusion Technology Transfert Activity 2, projet EURATOM en lien avec l'ESA TTPO qui a mis à disposition son réseau de « brokers ».

et d'information du grand public, apporter un éclairage scientifique sur la transition énergétique et le rôle du nucléaire dans son contexte.

Cette cellule pourra effectuer une veille scientifique et technologique notamment dans le cadre de la transition énergétique afin d'identifier des actions transverses interdisciplinaires entre les thématiques majeures de l'institut. Elle pourra également servir de support dans l'organisation d'actions aux interfaces avec les autres instituts. Elle sera en charge de l'organisation d'une journée par an à destination du grand public pour présenter les actions de l'institut tant en recherche et formation, et organiser des présentations/tables rondes sur la transition énergétique. Elle travaillera également à identifier d'autres actions telles que stands lors de conférences, d'écoles et lors d'événements comme « La nuit Européenne des Chercheurs ». Elle pourra également interagir avec le pôle de compétitivité CAPENERGIES, l'agence ITER France (AIF), et d'autres structures (SATT) pour le montage de nouveaux projets collaboratifs avec des industriels du secteur de l'énergie. L'AIF pilote en particulier le réseau welcome around ITER (W@I) et organise l'ITER Business Forum. Enfin, elle pourra aussi assurer un lien avec les diplômés de la Graduate School (suivi insertion, réseau/mise en relation, diffusion).

International

Définir une stratégie internationale en termes de partenariats.

La stratégie internationale développée par l'institut sera au service de ses ambitions en recherche et formation : i) devenir l'acteur européen leader des aspects interactions plasma paroi essentiels pour ITER, renforcer son expertise dans la compréhension des plasmas en combustion, se positionner sur les aspects nucléaires de la fusion, conforter sa position dans le domaine de la mesure en ligne en réacteur de recherche en l'étendant à la fusion nucléaire, devenir un acteur majeur pour les membres du consortium du RJH. ii) Devenir le hub européen de formation sur la fusion par confinement magnétique et leader dans la formation sur l'instrumentation en particulier des grandes installations nucléaires.

La stratégie internationale s'appuie en premier lieu sur les réseaux européens des équipes formant l'institut, qui sont déjà très développés, à la fois du point de vue recherche et du point de vue formation. Au niveau recherche, les réseaux fusion et fission se recouvrent partiellement puisque certains participants au programme Eurofusion ont des activités nucléaires (KIT, SCK-CEN, JSI). KIT est en particulier fortement impliqué sur la question des couvertures tritigènes pour ITER et DEMO.

L'institut, en appui de la FR-FCM, travaillera à soutenir et développer le leadership actuel du site sur les activités de modélisation des zones périphériques du plasma et des interfaces (projets impliquant en particulier l'EPFL, CCFE, IPP Garching, KUL), et la validation de ces outils sur WEST et les autres machines européennes. Cette action de l'institut pourra bénéficier d'un levier de financement important au niveau européen, avec la mise en place d'outils de soutien ambitieux à ces activités dans le plan cadre Horizon Europe. Un LIA France/Japon structure depuis 2007 une collaboration sur la physique des plasmas de fusion soutenue avec les équipes du NIFS, ainsi que des universités d'Osaka et de Kyushu. Ces collaborations pourront se renforcer avec le démarrage de <u>JT60-SA</u> à partir de 2022 d'une machine supraconductrice de la taille de JET financée dans le cadre de l'approche élargie d'ITER (partenariat Europe/Japon), qui explorera en particulier les régimes de confinement avancés pertinents pour l'étude des plasmas en combustion. Les collaborations avec les Etats-Unis sur la physique des plasmas, la modélisation des plasmas de WEST et les diagnostics seront poursuivies, mais il s'agit ici cependant plus

d'une coopétition, avec un aspect plus opportuniste de part et d'autres.

Au delà de ces partenariats bien établis avec des acteurs majeurs de la fusion au niveau international, le développement de collaborations avec la Chine est un enjeu très important pour les 10 années à venir. La Chine consacre en effet de très gros moyens à son programme de recherche national sur la fusion, avec deux tokamaks en opération (EAST, et HL-2M) et le projet CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor), de taille comparable à ITER et destiné à valider des technologies clés de la fusion. Ces collaborations sont amenées à monter en puissance, en particulier dans le cadre de SIFFER (Sino-French Fusion Energy centeR, porté par le CEA et le MOST, http://www.siffer.science). Des collaborations s'établissent par ailleurs sur les outils de modélisation des plasma de bord/interactions plasma paroi en vue du design de CFTER, et deux licences en copropriétés (CEA/AMU/CNRS/ECM) sont en cours d'établissement afin de permettre l'utilisation de ces outils par les équipes chinoises, outils mis à disposition dans le cadre de l'accord ITER. Les acteurs principaux à l'heure actuelle sont SWIP (Chengdu) et ASIPP à Hefei, où se trouve également USTC, Université avec laquelle nous souhaitons établir un partenariat en enseignement.

Concernant le domaine de la fission, l'institut renforcera dans les 5 ans ses liens avec les partenaires Européens tels que le centre nucléaire Polonais NCBJ, le centre nucléaire Belge SCK-CEN, l'Institut Slovène Josef Stefan, le KIT mais aussi le MIT (Etablissement cible hors réunion européenne d'AMU), l'Université Mohammed V (UM5, Université partenaire zone prioritaire d'AMU) et le centre nucléaire Marocain CNESTEN tant au niveau formation que recherche. Le développement de partenariats sera important pour réaliser des études intercomparées ou non en conditions réelles, ces partenaires possédant des réacteurs avec différentes caractéristiques (ZPR, MTR, TRIGA, Boucles en réacteur), et pour bénéficier de leur expertise dans le cadre de la création du nouveau parcours international (et effectuer des visites le cas échéant).

Aux niveaux européen et américain, ce renforcement s'appuiera sur des actions passées (programme ISMART) et en cours telles que les projets A*MIDEX qui permettront la mise en place d'accords ad-hoc

- MOBIL-APP (12/2018-11/2020), Projet lauréat de l'Académie d'excellence, dédié à la mobilité sortante d'apprentis du master IMM, porté par AMU, en partenariat au niveau Français le CEA, EDF, le CFA Epure Méditerranée et en partenariat au niveau international avec le NRL du MIT, le NCBJ, le JSI, le CNESTEN et le SCK-CEN
- CALOR-I (2019-2021), Projet lauréat de l'AAP International, dédié à l'étude et l'irradiation de capteurs calorimétriques innovants dans le réacteur MITR du MIT, porté par AMU, en partenariat avec le CEA et le Nuclear Reactor Laboratory du MIT

Les actions collaboratives avec le MIT permettront de cibler d'autres acteurs américains au travers par exemple du Nuclear Science User Facilities (NSUF) du DOE (US Department of Energy) constitué de 21 partenaires: universités, centres et laboratoires nucléaires et un industriel (Westinghouse), et incluant des universities prestigieuses telles que the Massachusetts Institute of Technology, the University of California - Berkeley, the University of Michigan, the University of Wisconsin, the University of Florida, the Illinois Institute of Technology, North Carolina State University, Ohio State University, Purdue University, Texas A&M University, and the University of Nevada - Las Vegas.

Ce renforcement s'appuiera également sur la conférence ANIMMA impliquant le JSI, IPFN, le SCK-CEN et le réseau de la société savante IEEE NPSS. Un chapitre dédié à l'instrumentation et la détection nucléaires en cours de création au sein de IEEE NPSS sera un excellent vecteur de communication, de

rayonnement.

Au niveau méditerranéen, ce renforcement sera possible dans le cadre de la convention quadripartite AMU-CEA-CNESTEN-UM5 dédiée à l'Instrumentation et les Mesures Nucléaires, déjà validée par la DRI et actuellement dans sa phase finale (aspects juridiques). Cette convention prévoit notamment le lancement d'activités de recherche, des échanges d'étudiants et d'enseignants, et des échanges dans le cadre de la formation continue et initiale pour le développement de modules délocalisés.

Au niveau formation, AMU est porteur du master européen <u>Fusion-EP</u> depuis 2018, impliquant 8 partenaires dans 5 pays, ainsi que 13 partenaires associés en Europe, dont ITER-IO, et 5 partenaires hors EU). Les équipes du site cherchent à renforcer ce partenariat, avec un projet de master conjoint Erasmus+ déposé début 2019 (8 partenaires⁴). La Chine, l'Inde et la Russie seront des partenaires majeurs, avec lesquels des partenariats existent déjà et d'autres sont en discussion. Enfin, le bassin méditerranéen est également un enjeu du point de vue de la formation, et le CEA mène des actions volontaristes vers la Tunisie, le Liban, l'Arabie Saoudite.

Mettre en place une politique RH d'attractivité étudiants et chercheurs (ERC...) sur les thèmes majeurs

L'institut mettra en place une politique de mobilité entrante à plusieurs niveaux, et en utilisant plusieurs leviers.

Premièrement, dans la Graduate School des bourses de master, attribuées sur critères académiques, seront mises en place. Le niveau master est en effet identifié comme le maillon le plus perfectible en termes d'attractivité d'étudiants internationaux. Pour accroître cette attractivité la GS soutiendra la création du parcours international dédié à l'Instrumentation des grands instruments du nucléaire, en particulier par des bourses de stage et la prise en charge de visites d'installations.

Toujours au niveau M, l'institut soutiendra également la poursuite de l'action lancée, grâce au projet MOBIL-APP de l'Académie d'Excellence d'AMIDEX, dédiée à la mobilité sortante d'apprentis du master IMM vers des acteurs du nucléaire possédant des grands instruments.

L'institut pourra financer des bourses de thèse et des post-docs en mobilité entrante sur ses thématiques majeures. Au niveau doctoral, cela pourrait passer par le redémarrage du système de bourses CEA/AMU, grâce à une coordination accrue au niveau juridique/administratif. L'institut travaillera avec EDF et l'IRSN pour cibler des sujets de thèses stratégiques et pouvant donner lieu à des montages de CIFRE, des bourses Région (cf. partie Liens avec le monde socio-économique). L'institut travaillera également avec ITER-IO pour définir des sujets de thèses d'intérêt commun, bénéficiant ainsi d'une attractivité accrue. Enfin, au niveau doctorat, l'institut contribuera au développement du partenariat avec le MIT en finançant des sujets de thèse communs impliquant par exemple des irradiations au sein du MITR

Au niveau post-doc, au delà des postes directement financés par l'institut pour piloter sa politique scientifique (3/an semble un minimum souhaitable pour assurer un impact réel), une stratégie de recrutement sera mise en place en fonction des différents guichets visés, notamment au niveau européen: Eurofusion (bourses de chercheurs ou ingénieurs Eurofusion, bourses Marie Curie ouvertes à EURATOM sur le prochain plan cadre). Certaines activités pourront également être soutenue dans le

⁴ AMU (coordinateur), INSTN, Université de Lorraine, Czech Technical Université (Prague) Universidad Carlos III (Madrid), Universidad Complutense (Madrid), Universiteit Gent, Universität Stuttgart.

cadre du schéma des ITER Project Associates (IPA), en accord avec le projet de MoU en cours de finalisation entre AMU et ITER-IO. Ce schéma permet à ITER de (co-)financer des personnels travaillant sur le projet, sur des thématiques d'intérêt commun avec les laboratoires du site. Un premier projet de ce type est d'ores et déjà en cours de montage.

Le positionnement des équipes de l'institut sur les ERC est plus difficile, puisque ceux-ci ne sont pas ouverts aux domaines financés par EURATOM. Cependant, l'expérience montre que certains projets non centrés sur la fusion ont été financés ces dix dernières années (3 à notre connaissance). La tactique consistant à proposer ce type de projets (par exemple avec des projets orientés principalement sur les applications de l'intelligence artificielle sur les simulations HPC, ou sur des problématiques communes avec l'astrophysique) sera poursuivie, potentiellement en interface avec d'autres instituts, et à plus long terme le travail de lobbying engagé auprès d'Eurofusion et de la commission pour lever cette restriction sera poursuivi (le blocage étant de nature budgétaire).

L'approche volontariste de l'institut sur les mobilités entrantes ne peut bien évidemment pas être déconnectée de la question de la stabilisation des meilleurs éléments sur des postes permanents, et donc des politiques de recrutement des laboratoires impliqués. L'institut mènera un travail de prospective, mis à jour régulièrement, en lien avec les laboratoires, visant notamment à identifier les thématiques à renforcer (importance stratégique, départ à la retraite de chercheurs/enseignants clés), pouvant par exemple faire l'objet de chaires A*MIDEX.

Liens avec le monde socio-économique

1- Valoriser et quantifier les apports des industriels en relation avec les thèmes scientifiques majeurs

Le développement de technologies pour les installations de fusion, aussi bien WEST au CEA Cadarache qu'ITER impliquent fortement des partenaires industriels. Les réalisations techniques nécessaires (composants de paroi et interfaçage avec la boucle de refroidissement, antennes radio-fréquences pour le couplage de puissance) requièrent très souvent le développement de techniques allant au-delà de ce que les industriels maîtrisent. Les solutions technologiques sont dans ces cas co-développées entre les équipes de l'IRFM par ex. et les industriels concernés. Ceux-ci gagnent ainsi en savoir faire et peuvent ensuite se positionner sur d'autres contrats, aussi bien dans le périmètre fusion (ITER,...) que sur d'autres applications. Ce positionnement est facilité par l'agence ITER France, via en particulier l'ITER Business Forum qui se tient tous les deux ans. Le budget de la phase I du projet de WEST (transformation de Tore Supra en WEST) est de 24M€ sur la période 2013-2016, et le budget de maintient en condition opérationnelle de WEST est de l'ordre de 4M€/an. A titre d'exemple, l'IRFM coordonne le consortium responsable de la fourniture du diagnostic Infra Rouge/visible à visée équatoriale d'ITER, consortium qui implique activement Bertin technologie (1 à 2 ETP/an consacré aux détecteurs et à leur blindage) et le CEA/DEN (neutronique), pour un coût total d'environ 50M€. Ce positionnement sur les mesures infra rouge résulte de l'expérience développée sur l'infra rouge sur Tore Supra en particulier, en collaboration avec l'IUSTI.

Les détecteurs et capteurs étant souvent développés pour le RJH spécifiquement afin de conserver un leardship sur la mesure en ligne par rapport aux autres réacteurs de recherche internationaux, il n'y a pas de commercialisation à ce stade. Cependant, les développements technologiques liés à la réalisation des différents dispositifs d'irradiations et de l'instrumentation associée fait intervenir différents industriels intervenants dans les études et la fabrication tels que KN-System, Thermocoax, Soterem ou des partenaires du consortium du RJH (EDF, FRAMATOME, TECHNICATOME). En termes de ressources relatives au RJH, les activités instrumentation, caractérisation

et mesure comprenant aussi bien la conception/développement des dispositifs d'irradiation que les détecteurs et capteurs les équipant occupent 15 ETP côté CEA. Pour ce qui est des achats/commandes/dépenses associés, cela s'élève à environ 200 M€ engagés en France dont les principales régions concernées sont : PACA, Aquitaine, Rhône-Alpes, lle de France. Les dépenses et engagements à l'international sont difficiles à chiffrer car elles comprennent des contributions en nature.

Par ailleurs concernant les activités liées à la fission, deux partenaires socio-économiques ont effectué des lettres de soutien: EDF et IRSN. Concernant EDF, différentes actions sont déjà conduites telles que côté CEA: thèses cofinancée CEA/EDF, programmes CEA/EDF; et côté AMU: accueil de stagiaires/apprentis, versement annuel de taxe d'apprentissage, VAE effectuées, recrutements, bourses de stage sur critères d'excellence ou sociaux, et visites de site. Nous nous appuierons sur la convention AMU-EDF d'application relative à l'Instrumentation signée le 2 mai 2019 pour poursuivre ces actions déjà menées et en lancer des nouvelles liées par exemple à la présentation des métiers d'EDF, aux enjeux énergétiques, à la diffusion de stages/apprentissages/emplois, à l'étude de nouvelles collaborations recherche, et l'étude de la contribution d'EDF à l'Institut, ... Après la création de l'Institut, nous avons convenu d'échanger avec EDF pour identifier des sujets d'intérêts communs sur les capteurs et la détection pouvant donner lieu à des financements de thèse sous forme de CIFRE par exemple. Nous pratiquerons également de la sorte avec l'IRSN qui nous a exprimé son soutien par son courrier. Des développements et des renforcements de collaborations ont été identifiés tels que dans domaine du vieillissement des structures nucléaires avec les recherches menées en commun par exemple sur la plate-forme ODE de Cadarache (observatoire de la durabilité des bétons).

2- Identifier les partenaires du monde socio-économiques stratégiques pour le projet

De part la nature des recherches menées, les partenaires clés de l'institut sont avant tout le CEA, qui est activement impliqué dans le projet, et ITER-IO. L'articulation avec le tissu industriel autour de ces grands partenaires, impliquant aussi bien de grands groupes (EDF, ORANO ...) que des PME locales est un élément d'attractivité important pour les étudiants. L'institut mettra en place deux interfaces avec ces partenaires, interfaces décrites précédemment : le Conseil Stratégique Emploi-Formation et la cellule progrès scientifique et technique.

3- Mener une réflexion sur le secteur de la santé (hôpital, entreprises) sur le thème radioéléments : estce stratégique pour ce projet?

Le thème des radioéléments innovants est clairement d'intérêt de santé publique et pertinent pour ce projet d'institut au vu des plateformes présentes sur le site de Cadarache (et en particulier de la construction du RJH), mais la production de ces éléments ne commencera réellement qu'à l'horizon 2025 (avec un démarrage du RJH prévu en 2022-2023). De plus les applications médicale de ces radioéléments (imagerie nucléaire, theranostique,...) entrent clairement dans le champ de l'institut d'imagerie pour la biologie et la médecine. En accord avec les porteurs de cet institut, nous pensons donc que cette thématique définit une interface entre nos instituts respectifs, et que cette interface est amenée à se développer avec l'entrée en production des radioéléments. Dans l'intervalle des actions de veille seront conduites au niveau de la recherche (en particulier au niveau de la cellule « Progrès Scientifique et Technologique ») et pour la formation des éléments sur les applications médicales des radioélements seront mises en place au sein du module aspects nucléaires et société.