



Feuille de route « Physique des réacteurs et simulation numérique »¹

La feuille de route considère la physique des réacteurs nucléaires conformément à la vision qui en a assuré le succès et l'efficacité : le progrès permanent de la capacité prédictive de simulations numériques validées ainsi que de la capacité de quantifier et de borner les incertitudes, de les transposer sans biais de résolution depuis les expériences jusqu'aux calculs opérationnels de dimensionnement, de sûreté, d'exploitation normale ou accidentelle.

La feuille de route est structurée par les contraintes et les objectifs suivants :

- La nécessité de relever à temps les grands défis liés à la **sûreté**, à la **compétitivité**, à la **durabilité** (ressources, déchets), pour le parc électronucléaire actuel, pour les réacteurs de Génération-3 (Gen-3), et pour ceux de Génération-4 (Gen-4). Ces défis jalonnent la période étudiée (2015 / 2025) avec des étapes à trois, cinq et dix ans ;
- La nécessité de capitaliser, au sein d'une **simulation multi-physique et multiéchelle**, le progrès des connaissances théoriques et expérimentales, depuis la recherche de base jusqu'au retour d'expérience industriel. C'est aujourd'hui, à une époque de rationalisation et de réduction des parcs expérimentaux, en particulier des installations visant à une représentativité directe, une option incontournable et porteuse d'une valeur scientifique et industrielle élevée. C'est dans cette vision que se développent les partenariats stratégiques autour du « **cœur numérique** » des réacteurs de fission de toutes générations ;
- La volonté d'inscrire la recherche et développement dans un **cadre européen** et de proposer des projets s'inscrivant dans les programmes de NUGENIA² et d'ESNII³, afin de préparer les décisions programmatiques d'**Horizon 2020**⁴ ;
- La volonté de fournir à l'ANR, dans le cadre national, une **vision des orientations prioritaires de la recherche** permettant de valider la pertinence de projets qui lui seront proposés en physique des réacteurs et disciplines connexes (modèles numériques, ...) dans les années à venir.

La feuille de route a permis d'identifier dans la suite du texte une quinzaine de projets repérés par le logo de l'ANCRE  appelés à être menés en coopération par les organismes contribuant aux recherches sur la physique des réacteurs et la simulation numérique.

Ces projets sont à même de fédérer les efforts de plusieurs acteurs de l'Alliance. Ils sont en continuité avec les travaux en cours. Ils permettent de développer de nouvelles synergies et d'accélérer l'atteinte d'objectifs prioritaires en physique, en conception nucléaire et en simulation numérique. Les projets les plus matures ont vocation à susciter des propositions d'actions coordonnées aux Agences de programme et Groupements de recherche dans le cadre français et dans le cadre européen.

¹ Cette feuille de route a été élaborée par le Groupe Programmatique « Energies nucléaires » de l'ANCRE avec pour principaux contributeurs : J-B. Thomas (CEA/DEN), E. Merle-Lucotte (CNRS/LPSC) et J. Miss (IRSN)

² NUGENIA Nuclear Generation II & III Association : Initiative industrielle de la plateforme européenne SNE-TP dédiée à l'exploitation sûre et fiable des réacteurs actuels et au déploiement des réacteurs de Génération-3

³ ESNII (*European Sustainable Nuclear Industrial Initiative*) : Initiative industrielle de la plateforme européenne SNE-TP dédiée aux recherches et démonstrations pour les réacteurs à neutrons rapides avec recyclage multiple

⁴ C'est dans ce sens que le Groupe Programmatique « Energies Nucléaires » (GP3) de l'ANCRE a proposé dès la fin de 2011 certaines voies de recherche pour les thématiques clés de NUGENIA

Table des matières

1	CONTEXTE ET ENJEUX.....	4
1.1	HISTORIQUE ET CONTEXTE.....	4
1.2	ENJEUX, OBJECTIFS.....	4
1.3	POSITIONNEMENT DE LA FEUILLE DE ROUTE PHYSIQUE DES REACTEURS ET SIMULATION NUMERIQUE.....	5
1.4	LA SITUATION ACTUELLE.....	6
1.5	DIFFUSION ET SYNERGIE EUROPEENNES, MONDIALES.....	8
	1.5.1 L'Europe : NUGENIA.....	8
	1.5.2 Autres cadres de coopération.....	8
	1.5.3 Orientations : chaînes stratégiques complètes, benchmarking international et progrès collectif.....	8
1.6	LE LIEN ENTRE LA RECHERCHE ET L'ENSEIGNEMENT.....	8
2	VERS UN PROGRAMME DE RECHERCHE COORDONNE.....	9
2.1	BESOINS.....	9
2.2	RESSOURCES ET SYNERGIES.....	10
2.3	L'OBJECTIF OPERATIONNEL, LE CALENDRIER, LES INITIATIVES.....	10
2.4	LA STRUCTURATION DES THEMATIQUES DEVELOPPEES DANS LES PARAGRAPHE SUIVANTS.....	12
3	NEUTRONIQUE.....	13
3.1	ENJEUX, MOTIVATIONS.....	13
3.2	THEMES CLES.....	13
3.3	VERROUS.....	14
3.4	APPLICATIONS.....	15
3.5	ACTIONS ET COOPERATIONS A DEVELOPPER.....	15
	3.5.1 Le calcul : transport des neutrons (Boltzmann) et évolution du combustible (Bateman).....	15
	3.5.2 Données nucléaires et physique des réacteurs expérimentale.....	17
	3.5.3 Détecteurs : développement des capteurs, des dispositifs ; interprétation de l'acquisition et simulation associée.....	18
	3.5.4 Outils d'études de scénarios nucléaires.....	19
4	THERMOHYDRAULIQUE.....	19
4.1	ENJEUX, MOTIVATIONS.....	19
4.2	THEMES CLES EN ECOULEMENT MONO ET DIPHASIQUE.....	20
4.3	VERROUS.....	20
4.4	APPLICATIONS.....	21
4.5	ACTIONS A DEVELOPPER ET COOPERATIONS.....	22
	4.5.1 Programme expérimental de validation des modèles nécessaires au progrès (précision, robustesse) des calculs de conception et d'analyse de sûreté.....	22
	4.5.2 Recherche amont sur la modélisation physique de la crise d'ébullition.....	22
	4.5.3 Fusion par confinement magnétique.....	23
	4.5.4 Recherche amont transverse en Mathématiques Appliquées.....	23
	4.5.5 Calculs étalons et calcul intensif.....	24
	4.5.6 Etudes d'écoulements polyphasiques en sels fondus (boucle en convection forcée FFFER).....	24
4.6	STRUCTURATION DE L'EFFORT NATIONAL ET COOPERATIONS A DEVELOPPER.....	24
5	COUPLAGES (MULTI-PHYSIQUES) POUR LES ETUDES DE DIMENSIONNEMENT SURETE....	26
5.1	ENJEUX, MOTIVATIONS.....	26
5.2	THEMES CLES.....	26
5.3	ACTIONS ET COOPERATIONS A DEVELOPPER.....	27
6	INCERTITUDES.....	29
6.1	ENJEUX, MOTIVATIONS.....	29
6.2	THEMES CLES.....	30
	6.2.1 Un effort méthodologique.....	30
	6.2.2 Une approche « top down ».....	30
6.3	VERROUS.....	31
6.4	APPLICATIONS PILOTES ET DEMONSTRATIONS.....	32
	6.4.1 - Applications pilotes par discipline.....	32
	6.4.2 - Applications pilotes par classe de systèmes.....	32

6.5	ACTIONS.....	33
6.5.1	<i>Méthodes d'évaluation et de fusion d'information.....</i>	33
6.5.2	<i>Méthodes d'utilisation des simulations en support à la décision.....</i>	33
6.6	STRUCTURATION DE L'EFFORT NATIONAL ET COOPERATIONS A DEVELOPPER.....	34
7	PLATEFORMES LOGICIELLES : INTEGRATION DE LA SUPERVISION ET DU CALCUL INTENSIF : DU CALCUL VERS LA RESOLUTION DE PROBLEME.....	35
7.1	L'INTEGRATION DU POTENTIEL DES PLATEFORMES LOGICIELLES GENERATRICES ET DE CELUI DU CALCUL INTENSIF : ENJEUX ET MOTIVATIONS	35
7.2	LES NECESSAIRES PROGRES DU CALCUL INTENSIF ET L'INTEGRATION DES PLATEFORMES LOGICIELLES GENERATRICES.....	36
7.3	THEMES CLES EN R&D SUR LE CALCUL INTENSIF DANS LE CADRE DE L'ANCRE	38
7.3.1	<i>Le contexte et les objectifs de la recherche.....</i>	38
7.3.2	<i>Les principales thématiques scientifiques.....</i>	39
7.3.3	<i>Les produits, les démonstrations, les jalons et les moyens.....</i>	40
8	ENSEIGNEMENT ET FORMATION	40
8.1	FORMATIONS EXISTANTES	40
8.1.1	<i>Formations spécifiques en ingénierie nucléaire.....</i>	40
8.1.2	<i>Formations spécifiques en sûreté nucléaire</i>	41
8.2	NOUVEAUX BESOINS / MOYENS DE FORMATION.....	42
8.2.1	<i>Nouveaux besoins de formation liés aux propositions de R&D en physique des réacteurs.....</i>	42
8.2.2	<i>Autres besoins</i>	43
9	SYNTHESE ET PERSPECTIVES	43
9.1	ÉLÉMENTS DE SYNTHÈSE	43
9.2	PROPOSITIONS D' ACTIONS COORDONNEES POUR GROUPEMENTS ET AGENCES DE RECHERCHE	44

1 CONTEXTE ET ENJEUX

1.1 HISTORIQUE ET CONTEXTE

Prévoir le comportement des systèmes nucléaires, **réduire les incertitudes et évaluer les marges** sont des attentes fortes de l'industrie nucléaire et constituent des enjeux importants à l'échelle mondiale. Dans ce cadre, l'objectif de la Physique des Réacteurs et du Cycle du Combustible Nucléaire est d'apporter les outils de décision optimisée aux acteurs responsables de la conception, de l'analyse de sûreté, de l'exploitation, de l'aval du cycle, de la gestion des déchets et du démantèlement. Efficacité, sûreté et compétitivité dictent le dimensionnement en capacité de puissance, en durée de fonctionnement, en taux de combustion du combustible nucléaire, en radioprotection, et déterminent les arbitrages rendus tout au long de l'exploitation. Ceci s'applique aux réacteurs de Gen-2, Gen-3, ainsi qu'aux projets de Gen-4. Une thématique de recherche majeure concerne l'évaluation des incertitudes : si l'on considère un parc énergétique doté d'une valeur de production de plusieurs centaines de G€ tel que le parc électronucléaire français, une réduction d'incertitude de 1% sur la capacité de puissance, la disponibilité, ou la durée de vie, a une valeur qui se chiffre en G€. Une des forces de la fission (qui la distingue de la fusion) est d'avoir pu, depuis l'expérience fondatrice d'Enrico Fermi en 1942, simuler avec précision la physique des cœurs dans une large gamme de situations, allant du fonctionnement normal à la plupart des accidents considérés dans le dimensionnement des réacteurs.

Cette capacité à aborder la physique des réacteurs via l'**expérience numérique** est fondée sur la pertinence et la fécondité de l'approche de physique mathématique issue de la physique théorique (Eugen Wigner, Jules Horowitz), des calculs analytiques puis de l'essor des méthodes numériques appliquées au calcul informatique. Cette démarche a de plus profité de l'effort considérable mené parallèlement sur la mesure des données nucléaires de base aux fins de maîtrise militaire, civile et de recherche fondamentale. Les disciplines associées à la neutronique dans la physique des réacteurs, afin de représenter complètement la phénoménologie et de prendre en compte les contre-réactions sur la puissance nucléaire, sont essentiellement la thermohydraulique, la simulation du combustible, la thermomécanique des structures et la chimie. Jusqu'au milieu des années 80, ces physiques ont été traitées avec des modélisations expertes adaptées aux calculs d'ingénierie, situation par situation et filière par filière, en développant un grand nombre de codes de calcul spécialisés, qualifiés dans un domaine d'application étroit. De plus, les différentes physiques étaient souvent traitées séparément, successivement, et la convergence multi-physique était alors assurée de façon artisanale. La démarche manquant de généralité constituait un obstacle au développement opérationnel, à la qualité de la simulation numérique et à une meilleure quantification des marges. Ce **besoin d'une démarche plus globale** a été pris en compte notamment via le lancement de grands projets destinés à créer des liens entre les différentes physiques.

1.2 ENJEUX, OBJECTIFS

L'un des objectifs de cette feuille de route est d'établir un bref état des lieux des travaux lancés dans ce cadre et d'explicitier la suite indispensable à planifier. Un défi ascendant est **la réduction des incertitudes et l'appréciation des marges, loin des conditions des expériences de validation** qui ne peuvent que rarement être directement « représentatives », notamment lorsqu'il s'agit de prédire le comportement de réacteurs en conditions accidentelles. Il s'agit notamment de définir des plans d'expériences analytiques à effets séparés sur de nouvelles installations expérimentales et de faire progresser la prédictivité des calculs. Il faut également compter avec la difficulté due aux couplages multi-physiques évoqués juste avant, incluant des physiques fortement non-linéaires.

Dans le cadre de la transition vers un bouquet (ou mix) énergétique décarboné, l'énergie nucléaire est sans doute appelée à en rester une composante importante en France. Un des enjeux majeurs est donc ici d'explicitier au mieux la stratégie des projets de recherche

entrepris et à entreprendre pour **favoriser la complémentarité et la transversalité** d'une part entre les différentes thématiques de la physique des réacteurs et d'autre part entre les différentes équipes de recherche académique et industrielle. Enfin, compte tenu des enjeux et des échéances relatives au développement d'un tel **mix énergétique décarboné**, un objectif de cette feuille de route est d'éclairer le lecteur sur la pertinence des recherches nationales en physique des réacteurs et en simulation numérique, ainsi que de leur cohérence avec les besoins des concepteurs et des exploitants pour les réacteurs actuellement en exploitation, pour les nouveaux systèmes nucléaires présentant des spécificités inédites et pour le cycle du combustible nucléaire associé

Une ambition de « **cœur numérique** » a été programmée en support à cet objectif, à travers divers projets stratégiques concernant aussi bien les futurs réacteurs de Gen-4 et les démonstrateurs associés (principalement ASTRID), que les réacteurs à eau légère de Gen-2 et de Gen-3. En effet, depuis 2000 environ, les principes novateurs élaborés en simulation numérique pour la physique des réacteurs durant la décennie précédente (1990 – 2000) ont été appliqués en France, dans le cadre de partenariats bi-, tri- ou quadripartites (EDF, AREVA, IRSN, CEA), soutenus par les contributions de la recherche amont et des organismes académiques, associés par un ou plusieurs partenaires à la résolution de problèmes précis. Les progrès accomplis et les outils développés mènent au seuil d'une nouvelle étape qu'il faut accompagner.

1.3 POSITIONNEMENT DE LA FEUILLE DE ROUTE PHYSIQUE DES RÉACTEURS ET SIMULATION NUMERIQUE

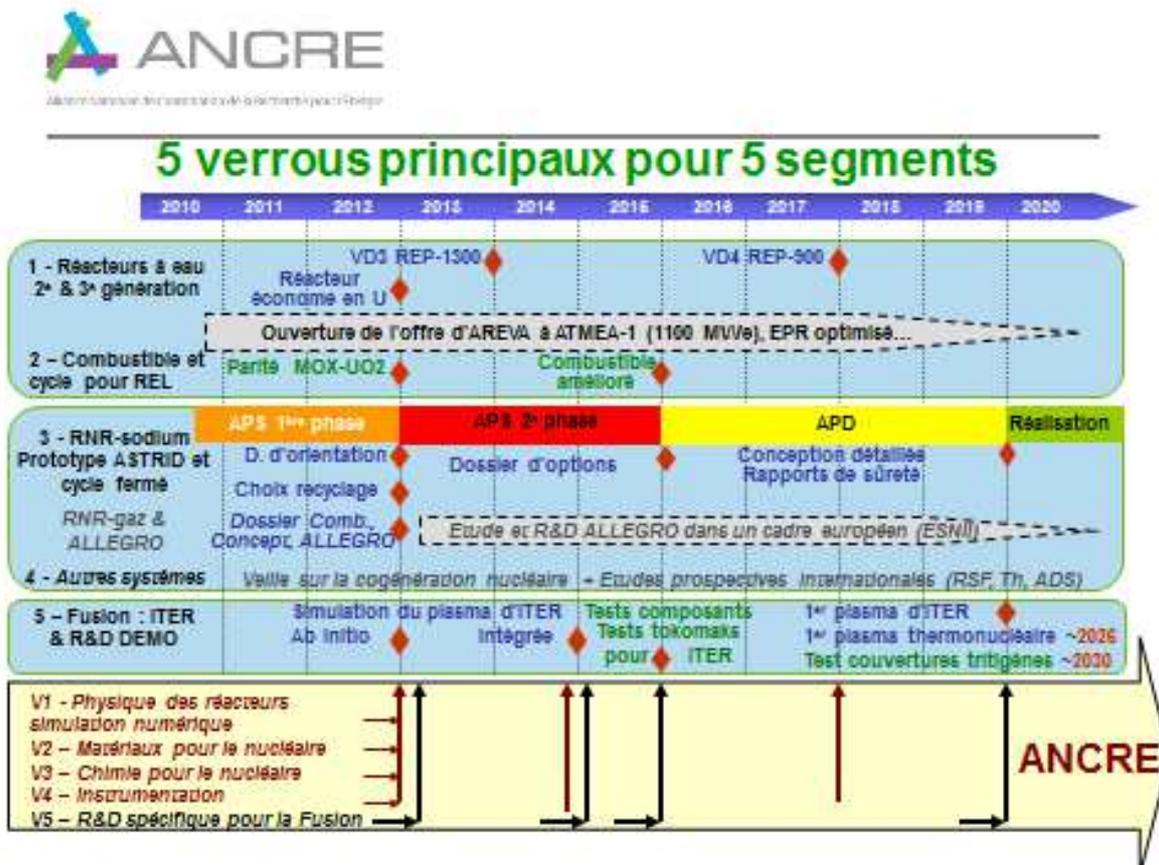


Figure 1 : Les grandes étapes de développement des réacteurs nucléaires (fission et fusion)

Comme présenté sur la figure 1, le thème de la feuille de route « Physique des réacteurs et simulation numérique » est couplé à d'autres thématiques majeures du Groupe Programmatique « Energies Nucléaires », pour lesquelles des feuilles de route ont été élaborées ou sont en cours d'élaboration dans le cadre de l'ANCRE :

- les matériaux et la mécanique des structures ;
- la chimie : couplage transport – chimie ; corrosion – activation dans les réacteurs ; radiolyse ; physique du cycle (évolution et criticité, radioprotection et chimie du retraitement) ;
- l'instrumentation : modélisation – simulation – interprétation et quantification des incertitudes ; analyse de signaux faibles et diagnostic précoce (ASTRID et RNR en particulier). Autres applications nucléaires (cycle du combustible) ;
- la R&D spécifique pour la fusion.

1.4 LA SITUATION ACTUELLE

Une méthode multi-échelle et multi-physique de développement et de validation expérimentale a été mise en œuvre dans chacune des disciplines du domaine de la physique des réacteurs et pour leur couplage, tout en poursuivant de façon continue le développement et la validation des logiciels de simulation opérationnels (figure 2).

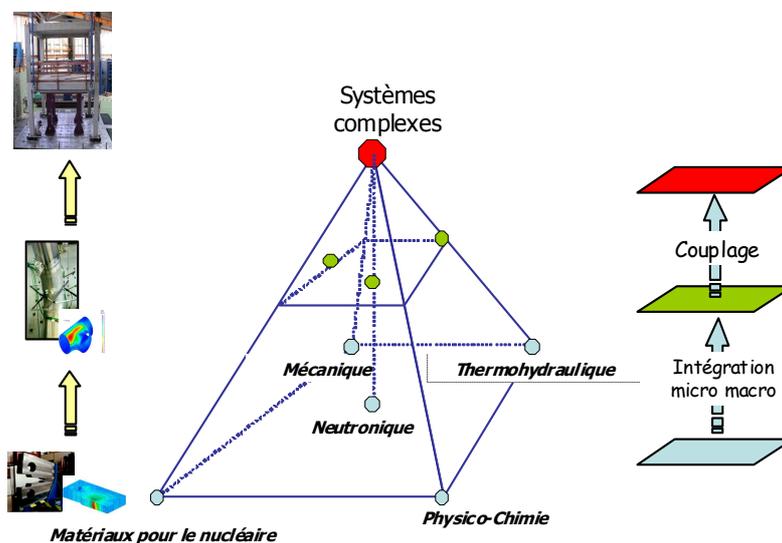


Figure 2 : La pyramide de la simulation

Une base d'outils de simulation numérique a été développée dans le cadre de partenariats nationaux (coopérations bi-, tri- ou quadripartites au sein du groupe des acteurs nucléaires - CEA, IRSN, EDF, AREVA). C'est le cas par exemple de la plateforme logicielle SALOME, dont le projet a été lancé dans le cadre du RNTL (Réseau National de recherche et d'innovation en Technologies Logicielles), poursuivi en pôle de compétitivité puis en projets européens : NURESIM⁵ et ses suites : NURISP⁶, NURESAFE. Le partage des méthodes et de certains outils (par exemple à travers la mise en *open source* de la plateforme logicielle SALOME) est en cours. Ce partage concerne en particulier la modélisation physique, ainsi que le calcul numérique intensif. Le Centre de Calcul Recherche et Technologie (CCRT) du CEA contribue à cet objectif, notamment par l'ouverture académique et industrielle de ses supercalculateurs dans leurs générations successives. Un nouvel élan de l'utilisation des

⁵ NURESIM : European Platform for NUclear REactor SIMulation (FP6, 2005-2008)

⁶ NURISP : Nuclear Reactor Integrated Simulation Project

mathématiques appliquées est requis, afin de bénéficier, dans la nouvelle étape, du rôle moteur qu'elles ont eu à l'origine de la physique des réacteurs.

Il s'agit aujourd'hui d'étendre le domaine des « disciplines numériques multi-échelle » aux physiques moins faciles à y faire accéder rigoureusement et efficacement que ne le fut la neutronique (des données nucléaires à la modélisation réacteur). C'est le cas de la thermohydraulique, traitée au paragraphe 4, avec le besoin d'une composante de recherche amont, aussi bien en phénoménologie et en expérimentation qu'en calculs « au mieux », exigeant toute la puissance du calcul intensif, ainsi qu'en réflexion de « physique mathématique » associant mathématiques appliquées et physique proche de « l'ab initio ». Le but final est de réaliser des calculs opérationnels d'ingénierie et d'analyse de sûreté où la thermohydraulique doit consommer des ressources de calcul ajustées à la minimisation optimisée des incertitudes résultantes, produit du couplage avec les autres physiques.

Il s'agit également, de développer la supervision logicielle des calculs dans la perspective de la résolution de problème à base de simulation numérique et de faire progresser l'utilisation du calcul intensif. En résolution de problème (optimisation multi-critères, diagnostic / pronostic / génération de plans d'actions, etc.), le calcul – à incertitudes contrôlées/minimisées – n'est qu'un maillon au service de raisonnements. Le pilotage du calcul doit donc être assisté/automatisé. La combinaison des progrès évoqués ci-dessus contribuera, moyennant des avancées méthodologiques concomitantes dans le domaine de l'évaluation et de la minimisation des incertitudes, à conforter l'appréciation des marges adoptées en conception, en exploitation. C'est le thème du paragraphe 7 qui mène du calcul vers la résolution de problème et identifie les besoins essentiels de méthodes et d'outils pour atteindre ce but. La démarche générale de progrès en physique des réacteurs et simulation numérique est illustrée à la figure 3.

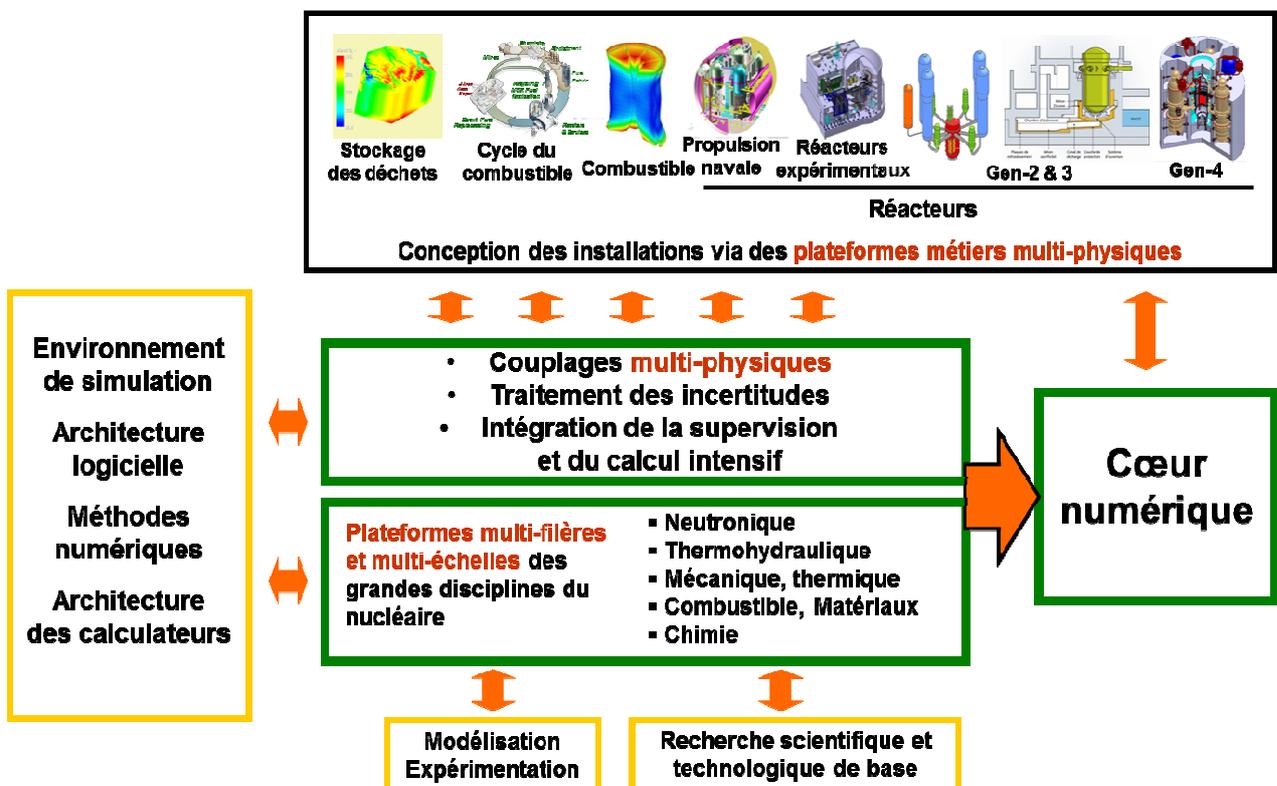


Figure 3 : Démarche générale de progression vers le « cœur numérique »

1.5 DIFFUSION ET SYNERGIE EUROPÉENNES, MONDIALES

1.5.1 L'EUROPE : NUGENIA

L'effort national s'est alimenté en contributions complémentaires et en soutien budgétaires à divers projets du Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD) européen. Il a débouché sur une diffusion européenne à travers les projets NURESIM puis NURISP. La plateforme européenne SNETP (*Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*) a pour mission d'établir une stratégie visant à conseiller la Commission Européenne pour les projets à engager sur la thématique « Fission » du programme cadre de R&D. Dans ce cadre, et dans le but de préparer les orientations du programme Horizon 2020, le consortium NUGENIA, dédié aux recherches sur les réacteurs à eau de Gen-2 et de Gen-3, a réactualisé, avec des apports de l'ANCRE, une feuille de route sur les priorités de recherche pour ces réacteurs.

1.5.2 AUTRES CADRES DE COOPÉRATION

D'autres contextes de coopération en R&D nucléaire et de diffusion internationale existent, dans lesquels la France est active. C'est le cas en particulier des agences internationales, telles que l'Agence de l'Energie Nucléaire (AEN) de l'OCDE, et l'AIEA. Des coopérations bilatérales existent également, par exemple en « benchmarking » (comparaison de codes de simulation numérique), au sein de l'Europe, et au-delà, avec le Japon, les Etats-Unis, la Russie, en particulier concernant Gen-4.

1.5.3 ORIENTATIONS : CHAÎNES STRATÉGIQUES COMPLÈTES, BENCHMARKING INTERNATIONAL ET PROGRÈS COLLECTIF

La stratégie constante des USA consiste à faire progresser, par étapes correspondant à des générations bien identifiées de logiciels, une bibliothèque d'outils de simulation numérique, couvrant les domaines industriels et commerciaux d'une part, stratégiques et de R&D d'autre part (famille MCNP en neutronique, famille TRAC en thermohydraulique accidentelle, etc.). Ces outils, associés à quelques bases de données clés (ENDF/B par exemple pour les données nucléaires) leur assurent une indépendance ainsi qu'une suprématie durable qui prive d'autonomie leurs partenaires et leurs clients, en particulier en Europe. La France assure quant à elle une couverture globale de cette base d'outils qui peuvent paraître nombreux (sauf en neutronique) mais dont l'enchaînement et le couplage au sein d'un calcul multi-physique font comprendre la nécessité. Cette stratégie (partagée) indique où se trouve la valeur et devrait inspirer l'Europe et la France, afin de maintenir une coopération internationale équilibrée où l'inter-comparaison (« benchmarking ») entre produits de même qualité augmente la robustesse et la sûreté pour tous.

1.6 LE LIEN ENTRE LA RECHERCHE ET L'ENSEIGNEMENT

La solidité des acquis apportés par les études en physique des réacteurs va de pair avec le développement d'une formation, à la fois adaptée et de qualité, des acteurs qui prendront en charge sur le long terme la création des outils, leur mise en place et leur exploitation. Cette exigence implique **la pérennité des équipes expérimentales et de développement**, ainsi que **la capitalisation et la transmission des connaissances**, en veillant à l'articulation effective des besoins industriels, notamment en termes de sûreté, avec les progrès scientifiques et technologiques. Si un certain nombre d'initiatives, renforçant l'association traditionnelle des organismes académiques à la résolution de problèmes scientifiques clés pour les énergies nucléaires, ont été prises récemment (par exemple le lancement du Laboratoire de Recherche Conventionné Manon, la mise en place des Instituts De Recherche Technologique - IRT- tels que System X), il convient d'étendre ce mouvement en fonction des opportunités qui apparaissent actuellement, notamment dans le cadre de l'Université Paris-Saclay (LaSIPS⁷) et dans le cadre du défi Nucléaire : Energie,

⁷ LASIPS : Laboratoire d'Excellence « Systèmes et Ingénierie du Plateau de Saclay »

Environnement, Déchets, Société (NEEDS⁸) lancé en 2012 par le CNRS dans le prolongement du programme PACEN⁹ consacré à l'aval du cycle du combustible nucléaire. Il convient de transférer les contenus essentiels de ce programme dans les projets fédérateurs de NEEDS et en particulier dans le Projet Fédérateur Systèmes Nucléaires (PFSN) pour ceux qui relèvent de la physique des réacteurs et de la Simulation Numérique et d'enrichir ces contenus en fonction des nouveaux besoins identifiés dans la feuille de route. C'est le cas en particulier des données nucléaires (traitées dans le cadre du Groupement de Recherche GEDEPEON¹⁰) et des mathématiques appliquées développées à l'origine dans le cadre du Groupement de Recherche MOMAS¹¹ mais qui sont d'une portée plus générale pour la physique des réacteurs et du cycle et pour la Simulation Numérique. Ce sont d'ailleurs des besoins transverses communs aux énergies en général : pétrole, énergies nucléaire, solaire, hydrolienne, etc.

Le mouvement décrit ci-dessus s'adresse à la fois aux activités de recherche et d'enseignement, ouvrant la voie à l'émergence de nouvelles formations qui seront précisées dans une rubrique spécifique (paragraphe 8) de la présente feuille de route.

2 VERS UN PROGRAMME DE RECHERCHE COORDONNÉ

2.1 BESOINS

Le bilan de la dernière décennie (2000 – 2010) fait apparaître, selon les thématiques et les disciplines, des besoins différents :

- soit le besoin, concernant notamment la neutronique, de poursuivre l'action coopérative entreprise en l'accompagnant à l'aide :
 - d'un approfondissement en amont (données nucléaires) ;
 - d'une extension du domaine traité (méthodes déterministes, méthodes stochastiques et en particulier Monte Carlo évoluant, couplages, propagation et minimisation des incertitudes) ;
 - d'une consolidation et d'un élargissement de la base de Vérification et Validation (V&V) : benchmarking en Monte Carlo évoluant (prise en compte de l'irradiation des combustibles et de l'irradiation des matériaux), interprétation d'expériences intégrales bien choisies.

Le rôle du calcul intensif dans ce programme est essentiel ;

- soit le besoin d'une relance théorique et expérimentale pour une discipline, visant à consolider son statut en tant que physique numérique multi-échelle. **Les mathématiques appliquées, le calcul intensif et l'innovation expérimentale y jouent un rôle majeur.** Un tel besoin concerne notamment la thermohydraulique. Dans ce cas, il est nécessaire, en parallèle, de poursuivre l'évolution des outils applicatifs pour le dimensionnement industriel et l'exploitation. Il sera d'autant plus aisé de viser le « juste niveau » de spécification en modèles validés et en méthodes numériques que la discipline aura gagné en maîtrise de situations traitables avec des calculs de référence.

Il en est de même pour la simulation du combustible nucléaire, dont l'intégration dans la Physique du cœur à un niveau de modélisation raisonné (mais plus fin que le niveau habituel) est une composante novatrice et essentielle du **projet de cœur numérique**.

⁸ NEEDS : Défi Nucléaire : Energie, Environnement, Déchets, Société

⁹ PACEN : Programme sur l'Aval du Cycle et l'Energie Nucléaire (1997-2011)

¹⁰ GEDEPEON : Gestion des Déchets et Production d'Energie par Options Nouvelles (projet de PACEN)

¹¹ MOMAS : Modélisation et Simulation Mathématiques pour le Stockage (projet de PACEN)

2.2 RESSOURCES ET SYNERGIES

Il est nécessaire de faire progresser à la fois :

- les dispositifs expérimentaux et l'instrumentation, pour mener à bien l'extraction de données valides ;
- les outils de choix et d'interprétation des expériences (plans d'expérience, données pertinentes – vis-à-vis du gain en précision des modèles - et modèles physiques à diverses échelles) ;
- l'association de la physique et des mathématiques appliquées dans la fondation de disciplines numériques multi-échelle et de leur couplage rigoureux et efficace ;
- la maîtrise et la mise en œuvre du calcul intensif et des évolutions associées en mathématiques appliquées (méthodes numériques et modèles calculables) et en génie logiciel.

Que ce soit dans le volet expérimental ou dans celui de la simulation numérique, les différents "métiers" (physique, instrumentation, analyse numérique et génie logiciel) sont étroitement imbriqués : "l'art" de chacun a un impact direct sur les autres. Il est indispensable de former des ingénieurs et des chercheurs qui maîtrisent au moins deux de ces métiers tout en ayant une connaissance non élémentaire d'un des autres.

2.3 L'OBJECTIF OPÉRATIONNEL, LE CALENDRIER, LES INITIATIVES

Il s'agit **d'accompagner l'effort de développement et de qualification** mené en coopération par les acteurs du nucléaire industriel (EDF, AREVA, IRSN, CEA...) avec des apports d'acteurs académiques et de l'enseignement (CNRS, CPU, CDEFI...), afin de développer d'ici 2025 une plateforme multi-filière qualifiée capable d'utiliser aussi bien les moyens de calcul intensif que les ressources courantes des divers acteurs de l'industrie, de la recherche académique et de l'enseignement.

Un catalyseur majeur de cet objectif est **le défi du « cœur numérique »** en physique des réacteurs (neutronique, thermohydraulique, combustible, assemblage et interaction fluide-structure, ainsi que chimie) en fonctionnement normal et accidentel, avec la capacité de minimiser (sous contraintes de ressources) les incertitudes de la simulation numérique multi-physique. La figure 4 illustre la diversité des disciplines et des échelles en physique des réacteurs.

On peut compter parmi les objectifs opérationnels :

- l'optimisation de la durée de vie du parc électronucléaire actuel, les analyses de sûreté intégrant les enseignements post-Fukushima, les évolutions et l'optimisation de l'exploitation des réacteurs à eau de Gen-2, puis Gen-3, l'évolution vers Gen-3+ (modification du cœur), les réacteurs de recherche et les réacteurs spécifiques, dont le RJH ;
- le démonstrateur ASTRID, les réacteurs rapides au sodium (RNR-Na) et autres systèmes de Gen-4 étudiés en France (réacteurs à sels fondus, réacteurs rapides à gaz et systèmes pilotés par accélérateur : conception, sûreté, optimisation) ;
- l'aval du cycle du combustible nucléaire actuel et des nouveaux combustibles ;
- la fusion thermonucléaire : première paroi, couvertures tritigènes, systèmes de conversion d'énergie.

Éléments de planning

2017	Grands défis numériques pour les réacteurs à eau : calculs multi-physiques des assemblages combustibles et du cœur (cœur numérique)
2018	Grands défis numériques pour les réacteurs à neutrons rapides à combustibles solides ou à sels fondus : calculs dynamiques et multi-physiques du cœur en fonctionnement normal et accidentel
2020	Calculs étalons pour réacteurs à eau, réacteurs à neutrons rapides (ASTRID) et réacteurs à fusion (couverture tritigène et Test Blanket Modules (TBM) d'ITER)
2025	Nouvelle génération de plateformes de simulation multi-physique et multi-filière
A partir de 2030	Démonstrateurs d'autres systèmes de Gen-4 (MSR, GFR), ADS

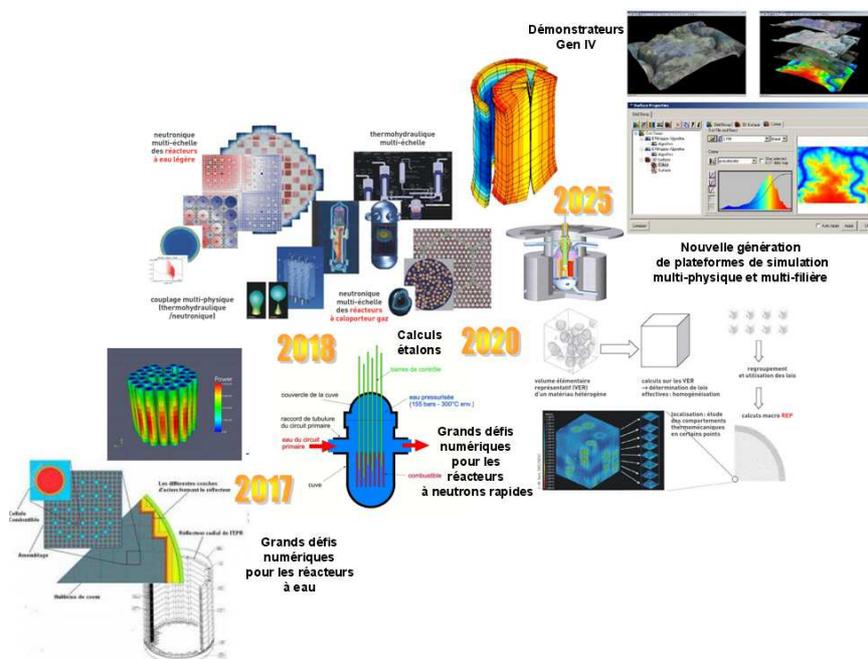


Figure 4 : Diversité des disciplines et des échelles en physique des réacteurs neutronique, thermohydraulique, thermomécanique, physico-chimie, modélisation des matériaux et des combustibles

Nouveaux cadres nationaux d'actions coordonnées

- Le défi NEEDS du CNRS, relais de PACEN, en collaboration avec le CEA, EDF, AREVA, l'IRSN, l'ANDRA, via le Projet Fédérateur « Systèmes Nucléaires », relais de PACEN ;
- les laboratoires de recherche conventionnés (LRC Manon (CEA & Laboratoire J-L Lions (CNRS & UPMC)...)
- le consortium industriels-académiques ReDICE (Repet Deep Inside Computer Experiments) dans le domaine des mathématiques appliquées et des statistiques.

Initiatives d'excellence

- School of Engineering de l'Université Paris-Saclay ;
- Labex LaSIPS (Laboratoire de Sciences de l'Ingénieur du Plateau de Saclay), avec CEA, ECP, ENS Cachan, Ecole Polytechnique, ENSTA, Paris XI (LIMSI) ;
- Labex P2IQ (Physique des deux Infinis et des Origines), coordonné par la Fondation de Coopération Scientifique du Campus Paris Saclay et le Laboratoire de l'Accélérateur

- Linéaire du CNRS-IN2P3, avec plusieurs UMR associant des laboratoires du CNRS (INP, IN2P3, etc.) avec l'Ecole Polytechnique, le CEA, etc ;
- SARNET (Severe Accident Research NETwork of excellence) : ce réseau d'excellence européen a débuté son activité en 2004 dans le cadre du 6^e PCRD de la Commission Européenne. Coordonné par l'IRSN, SARNET rassemble 43 organismes impliqués dans la recherche sur la sûreté des réacteurs nucléaires (Instituts de sûreté, Universités, Industriels, Centres de recherche ...), dans 18 pays européens ainsi que les États-Unis, le Canada, la Corée du Sud et l'Inde. L'un de ses principaux objectifs est de mieux coordonner les capacités de recherche sur les accidents graves avec fusion du cœur ;
 - ETSON (European Technical Safety Organisations Network) : alors que la sûreté et la sécurité nucléaires demeurent des sujets d'importance majeure pour la communauté internationale, les acteurs européens partenaires d'ETSON (<http://www.etsongroup.eu>), par leur approche commune et leur indépendance de jugement, fondent la sûreté nucléaire sur une démarche scientifique rigoureuse et sur une approche holistique de l'expertise de sûreté et de sa recherche finalisée. Leur travail commun contribue à favoriser l'harmonisation des procédures de contrôle des activités nucléaires, tout en fournissant un cadre d'échange et de partage d'information avec leurs homologues étrangers. ETSON regroupe actuellement 6 acteurs de la sûreté nucléaire européenne : l'IRSN (France), la GRS (Allemagne), le Bel V (Belgique), le VTT (Finlande), l'UJV (République Tchèque) et le LEI (Lituanie). La France via l'IRSN est l'un des membres fondateurs de ce réseau d'excellence.

2.4 LA STRUCTURATION DES THÉMATIQUES DÉVELOPPÉES DANS LES PARAGRAPHE SUIVANTS

Les principaux domaines à considérer sont la neutronique, la thermohydraulique, la physique des matériaux, la mécanique des structures ainsi que la chimie. Pour les domaines transverses prioritaires, il s'agit des mathématiques appliquées, dont les méthodes numériques et les statistiques (mais également la représentation des connaissances et la modélisation mathématique des risques), de l'instrumentation et des dispositifs expérimentaux innovants incluant le traitement et la maîtrise des incertitudes (mettant en œuvre les méthodes probabilistes), et enfin du génie logiciel (supervision des calculs, conditions du couplage des disciplines dans la simulation multi-physique, relation au calcul intensif).

Les thèmes clés, objets d'une focalisation des actions concertées, sont articulés de la façon suivante, fournissant la trame des chapitres suivants :

- la neutronique ;
- la thermohydraulique, notamment diphasique ;
- les couplages en calcul multi-physique–multiéchelle (optimisation, sûreté) ; en particulier, le couplage étroit entre neutronique et simulation du combustible ;
- les incertitudes et l'estimation des biais : calcul, maîtrise, minimisation sous contraintes, propagation ;
- les études de sensibilité : développement de méthodes stochastiques et statistiques dédiées, en lien étroit avec la communauté des mathématiques appliquées ;
- les plateformes logicielles génératrices : intégration de la supervision et du calcul intensif, pré et post traitement.

Parmi ces 7 thèmes, seuls les deux premiers sont spécifiques du nucléaire, ainsi que la physique des matériaux sous irradiation – qui trouve ses racines dans les données nucléaires et dans le calcul des flux de particules (neutrons, particules chargées) à l'origine des chocs – traitées dans la feuille de route ANCRE consacrée aux matériaux. Toutefois, les

phénoménologies considérées, **la précision et les performances requises dans les calculs « multi-physiques », sont souvent uniques** (en comparaison avec d'autres domaines industriels) et justifient une approche intégrée. Les méthodes de simulation développées pour la physique des réacteurs ont inspiré d'autres disciplines essentielles pour les applications industrielles. Réciproquement, les progrès réalisés dans d'autres disciplines et pour d'autres secteurs industriels (aéronautique, espace) peuvent inspirer ou alimenter en produits la physique des réacteurs.

Enfin, le thème concernant les plateformes logicielles qui combineront l'assistance à la résolution de problèmes et la supervision du calcul avec le calcul intensif (HPC)¹² est d'une nature différente. Il n'implique pas d'action ANCRE de la part de la communauté de la physique des réacteurs mais explicite les conditions nécessaires au succès de ses projets dans les délais impartis et plaide pour que les physiciens disposent à temps des outils et de la puissance de calcul (bien adaptée et bien « instrumentée » pour l'interprétation et la validation des résultats) qui leur seront nécessaires dans les dix ans à venir.

Les disciplines abordées seront traitées selon le plan suivant : les **enjeux et motivations**, les **thèmes clés**, les **verrous**, les **applications**, les **actions à développer, notamment dans le cadre de l'ANCRE, et la structuration de l'effort national ainsi que les coopérations à développer**.

Un dernier chapitre sera dédié aux activités d'enseignement et de formation permettant de juger de l'étendue de l'offre cohérente avec les enjeux d'avenir industriels et de sûreté. L'étendue et la qualité de cette offre, en perpétuelle adaptation, s'inscrivent dans un projet global qui constitue une condition sine qua non en amont de l'innovation permettant de relever les défis des nouveaux systèmes nucléaires en accord avec les impératifs sociétaux, économiques, environnementaux et climatiques du futur.

Les actions considérées ci-dessous ne représentent pas le corps des actions menées ou déjà programmées en partenariat dans les coopérations existantes et ne peuvent se substituer à l'effort entrepris dans ce cadre. Il s'agit d'actions nouvelles partagées par plusieurs acteurs de l'ANCRE. Elles assurent l'accélération, l'approfondissement ou la consolidation des progrès. Elles sont nécessaires au respect de la feuille de route, et susceptibles de donner lieu à court terme à des projets labellisés ANCRE. Elles sont repérées dans le texte par le logo de l'ANCRE : .

3 NEUTRONIQUE

3.1 ENJEUX, MOTIVATIONS

L'objectif global de « **cœur numérique** » nécessite la **minimisation des incertitudes sur les calculs couplés neutronique – thermohydraulique – thermomécanique du combustible et des structures** sous flux. Ces calculs présentent une complexité variable, des REP aux RNR (par exemple le concept intégré de RNR-Na avec des interactions mécaniques complexes des structures support et des régimes de circulation naturelle étendue en cuve) et autres systèmes de 4^{ème} Génération. La part relevant de la neutronique est résumée ci-après. Indépendamment du couplage étroit avec la thermohydraulique et avec la mécanique (par exemple en Interaction Fluide–Structure (IFS)), elle entretient des liens forts avec l'instrumentation, avec la science des matériaux et avec la chimie.

3.2 THÈMES CLÉS

La « neutronique » et une partie des interactions rayonnement–matière sont précisément simulées par le couplage des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) de Boltzmann (transport) et de Bateman (évolution isotopique). Le calcul prédictif du système Boltzmann – Bateman suppose des progrès dans les données nucléaires et dans la résolution « haute-fidélité » des systèmes d'EDP. La confiance est obtenue par la

¹² HPC : High Performance Computing

convergence – symbiotique – des voies de résolution largement indépendantes que constituent le calcul Monte Carlo ponctuel et les méthodes déterministes. Par ailleurs, il existe une liaison entre la physique nucléaire neutronique et l'ab initio atomique des matériaux sous flux. L'articulation de ces thèmes est représentée par la figure 5 suivante.

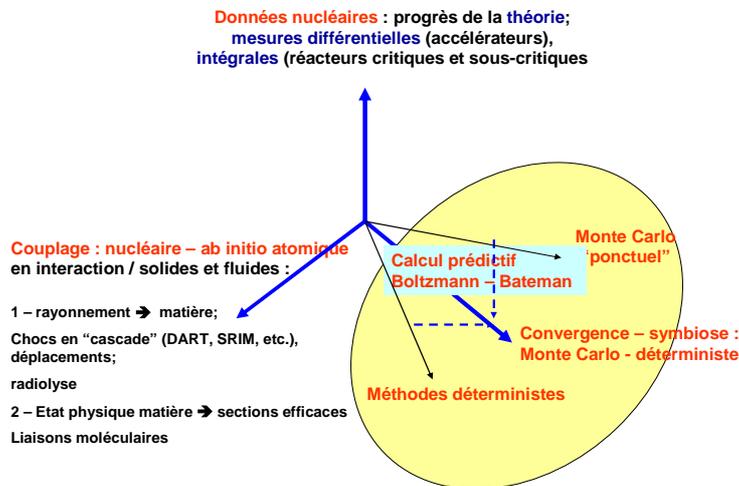


Figure 5 : Les différentes approches et données pour la simulation en neutronique

3.3 VERROUS

Il n'existe pas à proprement parler de verrous mais l'atteinte de l'objectif de **cœur numérique multi-filières et multi-applications** suppose un travail de longue haleine (une dizaine d'années) mobilisant ressources théoriques et expérimentales, avec l'appui décisif des mathématiques appliquées et du calcul intensif.

La poursuite de l'effort par toutes les compétences engagées depuis le début des sciences et technologies nucléaires est donc nécessaire : équipes de recherche fondamentale (physique nucléaire, physique des particules) ; équipes consacrées au développement des applications militaires ; équipes travaillant sur les énergies nucléaires (fission et fusion) en développement, conception et en analyse de sûreté.

Un paradoxe existe cependant quant au développement des cœurs numériques. En effet, cet objectif est basé sur l'utilisation de données nucléaires de base toujours plus précises (notamment pour les calculs multi-physiques et les méthodes d'estimation des biais) obtenues via des programmes expérimentaux souvent lourds alors que l'avenir est incertain pour les moyens expérimentaux permettant d'améliorer ces données ou d'en fournir de nouvelles relatives aux nouveaux systèmes. Ces données nucléaires ont pour objectif de fournir aux codes de simulations pour les applications aussi bien civiles que militaires, des données synthétisant l'ensemble des connaissances expérimentales et théoriques. Cette thématique éminemment transverse fait appel à la fois à l'expérience, à la théorie, à l'évaluation qui effectue la synthèse des deux et s'étend jusqu'à la validation par la simulation et la mesure d'expériences intégrales (notamment pour la sûreté criticité). **Comprendre et maîtriser l'ensemble des activités liées aux données nucléaires, allant de la physique fondamentale des interactions nucléaires à leur formatage dans les évaluations internationales puis au processus de création des bibliothèques utilisées par les codes de calculs, est de nos jours essentiel à l'objectif de simulations complètement maîtrisées.** En effet, l'ensemble de ces étapes liées aux données nucléaires, sont les briques de base de toute simulation (déterministe ou probabiliste) et sont donc déterminantes pour la qualité des résultats de calculs utilisés pour toute modélisation de nouveaux concepts et systèmes (parc électronucléaire, installations du cycle du combustible...). **Une réduction des moyens permettant d'améliorer les données nucléaires** pourrait donc constituer un verrou à la poursuite des travaux de R&D de neutronique entrepris pour minimiser les incertitudes des simulations nécessaires à la

qualification des nouveaux designs. Les nouvelles conceptions qui nécessitent une recherche de précision renouvelée font apparaître :

- des cœurs plus hétérogènes afin d'améliorer la sûreté (coefficients de température, de puissance, de vide), les performances du cycle en pile ;
- de nouveaux matériaux combustibles ou caloporteurs.

3.4 APPLICATIONS

Les applications couvrent :

- **la neutronique** des cœurs critiques et (légèrement) sous-critiques – ADS ;
- **le transport et l'atténuation des neutrons et des rayons gamma** (« shielding », radioprotection) ;
- **l'étude de la criticité** et de son approche sous-critique en réacteur ou dans les installations du cycle ; en transport des matières nucléaires ; en stockage géologique ;
- **l'évaluation des puissances résiduelles**, des compositions isotopiques, des rayonnements émis, de la radiotoxicité, depuis la fabrication du combustible en passant par les réacteurs et jusqu'au stockage ;
- **l'étude des scénarios prospectifs**, avec calcul des déchets produits, besoin en retraitement et quantité de matière fissile en cycle.

C'est l'ample domaine des applications de la physique nucléaire aux énergies nucléaires (et à d'autres applications, dont la santé) qui trouve ses fondements dans la « neutronique ».

Les outils de simulation de référence (bibliothèques, calculs étalons « haute fidélité ») couvrent, sans spécialisation (hors ADS), l'ensemble des systèmes étudiés : critiques, sous-critiques, à spectre thermique ou rapide, Gen-2 à 4. Une extension des données nucléaires concerne les neutrons de 14 MeV de la fusion par réaction D-T, les particules chargées et les neutrons de plusieurs centaines de MeV à quelques MeV issus des réactions de spallation – ou les neutrons d'une quinzaine de MeV issus de réactions de stripping, comme sur SPIRAL-2 par exemple. Toutefois, des approfondissements spécifiques restent nécessaires. Ils dépendent – parfois dans le détail - des options adoptées pour le cycle : taux de combustion, recyclage, transmutation.

3.5 ACTIONS ET COOPERATIONS À DÉVELOPPER

3.5.1 LE CALCUL : TRANSPORT DES NEUTRONS (BOLTZMANN) ET ÉVOLUTION DU COMBUSTIBLE (BATEMAN)



Objectif « cœur numérique » : les incertitudes « numériques » des calculs étalons effectués avec l'aide du calcul intensif à la fin de la période considérée (vers 2020), devront être nettement inférieures, pour toutes les configurations d'intérêt, aux incertitudes provenant des données ainsi qu'à celles, malheureusement importantes, découlant de la connaissance imparfaite de l'état (géométrie, bilan matière) du système calculé, en conception ou en exploitation.

Le calcul Monte Carlo évoluant

Fin du développement, progrès mathématiques et algorithmiques en réduction de variance (impliquant probablement la synergie avec les calculs déterministes), benchmarking entre partenaires français, vérification et validation (V&V) étendues (expériences critiques, retour d'expérience industriel dont l'analyse fine des évolutions de réactivité, échantillons irradiés). Une attention particulière est portée aux **difficultés de convergence numérique** (notamment sur les flux locaux), qui peuvent conduire à des déviations significatives sur les

grandeurs cibles. Les programmes de travail communs, déjà initiés entre le CEA, le CNRS et l'IRSN autour de cette problématique, seront poursuivis.

Un programme de « benchmarking » est engagé entre des outils du CEA, du CNRS et de l'IRSN, accroissant la robustesse de la vérification (au sein du processus VV&UQ : Verification – Validation & Uncertainty Quantification), sur des cas REP et RNR-Na en évolution, en vue de dégager des critères de convergence sur les principaux paramètres de simulation. En outre, les influences des données nucléaires et d'évolution (notamment des chaînes d'évolution) devront être quantifiées.

A terme, l'intercomparaison des outils « Monte Carlo plus évolution » (Boltzmann – Bateman) concernera TRIPOLI (CEA), MURE&REM (CNRS) et VESTA (IRSN).



Le couplage du Monte Carlo neutronique à des calculs déterministes dans d'autres physiques

Le couplage des calculs de neutronique s'envisage en priorité avec la thermohydraulique et avec la simulation du comportement du combustible (voir le § 5 : couplages). Ces couplages nécessitent une représentation paramétrique efficace des données nucléaires en fonction de la température du combustible, de l'état atomique du milieu ...



Le progrès des calculs déterministes

La précision des calculs déterministes en 2D est devenue comparable à celle des calculs Monte Carlo. Elle n'est pas affectée par les difficultés de réduction de variance auxquelles sont soumis les calculs Monte Carlo. La conquête du 3D est plus difficile et plaide pour **une coopération entre Monte Carlo et déterministe**. En déterministe, la représentation des données nucléaires, même dans les découpages énergétiques à plusieurs milliers de groupes, doit être améliorée. La vérification de la qualité des bibliothèques multi-groupes peut s'appuyer sur la référence du calcul Monte Carlo ponctuel. Le paramétrage des données nucléaires en fonction de la température et de l'état atomique du système doit être amélioré. Le calcul déterministe est foncièrement « multi-niveau » en termes de modélisation. Il permet de réaliser à la fois des calculs étalons en utilisant le potentiel du calcul intensif et des calculs opérationnels rapides (quelques secondes) sur ordinateur de bureau, avec des paramétrages, des schématisations et des bibliothèques différents. Les méthodes déterministes ont surtout été développées au sein des partenariats entre EDF, AREVA, l'IRSN et le CEA. En France, c'est le code APOLLO, développé au CEA à travers une chaîne d'actions coopératives datant des années 1970, qui constitue la base commune et dont le processus de développement-validation se poursuit. Les acteurs académiques, en France, sont à ce jour moins engagés dans le développement des méthodes déterministes que dans celui des méthodes de Monte Carlo.

La spécificité de la recherche académique pourrait toutefois être mise à contribution sur des points de développements des codes déterministes et de couplages notamment avec le Monte Carlo comme indiqué dans le paragraphe suivant.



Vers les calculs étalons « haute-fidélité » utilisant massivement le calcul intensif Extension du domaine de benchmarking, de V&V.

Ces calculs utiliseront la coopération déterministe – Monte Carlo afin d'accélérer la réduction de variance tout en conservant une précision locale élevée, comme c'est le cas pour les calculs de protection (shielding). Au-delà, il faut accéder à une symbiose au sein du même calcul. Le problème posé est également celui de la définition d'un méta-modèle permettant de représenter économiquement et rigoureusement (sans l'altérer) le même état physique du système calculé dans la vision « individuelle » (« scores », événements) du calcul « statistique » et dans la vision « statistique » (moyennes en espace, énergie, temps) des calculs « déterministes ». Les calculs convergés (Monte Carlo – déterministe) seront considérés comme « prédictifs » du point de vue de la résolution des équations de Boltzmann et Bateman (comme la parabole en balistique simplifiée), dans la mesure où la qualité du résultat ne dépendra plus – au premier ordre – que de la qualité des données nucléaires et de la connaissance de l'état du système. La vérification des calculs est alors

incluse dans leur convergence même. La validation peut alors être relancée, en fonctionnant comme un laboratoire de balistique, et en s'attachant à la réduction des biais et des incertitudes sur les données nucléaires (voir plus loin). Ce processus est déjà engagé.

3.5.2 DONNÉES NUCLÉAIRES ET PHYSIQUE DES RÉACTEURS EXPÉRIMENTALE

Ce domaine se caractérise par la diversité des thèmes de R&D qu'il aborde : de **la théorie à l'expérience, du fondamental à l'appliqué, du développement de l'instrumentation à la détection**. Il concerne notamment la théorie du problème à N-corps, les questionnements sur la fission ou les isomères, et l'ensemble des activités de R&D relatives aux données nucléaires en général. En résumé, le choix est d'aller toujours plus vers le microscopique plutôt que vers des approches « macroscopiques » qui ne pourraient pas donner toutes les informations nécessaires sans avoir recours aux ajustements. Cette démarche se traduit par des travaux pointus sur la mise en place de méthodes dites « Backward-Forward Monte Carlo » ainsi que sur la mise en place de plans d'expériences et sur l'utilisation de méta-modèles et de méthodes d'optimisation par krigeage. Ces approches font appel à des techniques en mathématiques appliquées dont les utilisations sont très transverses et exploitées par la communauté des statisticiens. Un lien direct existe donc entre les activités liées aux données nucléaires et les activités sur les incertitudes présentées au paragraphe 6. Ce domaine fait l'objet de contributions de la part de nombreux acteurs, depuis l'origine. Les bibliothèques de données nucléaires n'ont pu voir le jour et progresser que par la communauté d'intérêt (et parfois le partage d'outils expérimentaux) entre les chercheurs travaillant sur la physique nucléaire en recherche fondamentale, les architectes des armes et les équipes travaillant sur les applications civiles de l'énergie nucléaire. Cette coopération se poursuit au CEA entre les directions concernées qui ont par exemple signé conjointement en 2008 l'accord de collaboration avec le centre de Geel en Belgique (accélérateur Gelina en particulier). Au CNRS, l'IN2P3 représente l'Institut d'excellence dans ce domaine et y concentre les actions propres aussi bien que la contribution aux collaborations européennes (n-TOF au CERN, par exemple). Les progrès réalisés sont intégrés au sein de la bibliothèque de données nucléaires JEFF, bibliothèque européenne dont le CEA assure l'évolution et la comparaison, dans les instances internationales, avec les autres bibliothèques de référence : ENDF-B (USA) ; JENDL (Japon). C'est le travail du groupe JEFF (Joint Evaluated Fission and Fusion file) de l'OCDE/AEN.

Aujourd'hui, les partenaires concernés par les applications nucléaires énergétiques participent au Projet Fédérateur Systèmes Nucléaires de NEEDS. Là encore, à noter que **l'obtention de nouvelles données expérimentales sera indispensable en compléments aux développements de nouveaux modèles de physique nucléaire** (progrès de la théorie du problème à N-corps) tels qu'évoqués plus haut.

Les accélérateurs constituent bien sûr un outil indispensable pour les mesures de données nucléaires. Leur coût rend indispensable leur mutualisation au niveau européen voire international. Il ne faudra pas cependant négliger l'importance de maintenir des machines locales qui, si elles sont nécessairement plus petites, ont une plus grande disponibilité en terme de temps de faisceau, mais aussi une plus grande souplesse d'utilisation grâce à leur plus petite taille et au nombre réduit d'utilisateurs.

Les principaux besoins en faisceaux de neutrons sont actuellement remplis par l'utilisation de la ligne n-TOF du CERN, de GELINA à Geel et à moyenne échéance à la ligne NFS de SPIRAL2, au GANIL. Ces installations complémentaires aux faisceaux de neutrons disponibles auprès de réacteurs tels que l'ILL sont importantes à maintenir et à développer.

Lorsque les expériences ne sont pas réalisables avec un faisceau de neutrons, certaines études peuvent être réalisées en utilisant des faisceaux de particules chargées, via les « réactions de substitution » (« *surrogate reaction* », en anglais). Des machines comme l'accélérateur Van de Graaf de Bordeaux et le Tandem-Alto d'Orsay sont à cet égard particulièrement importantes à maintenir.

Pour les études plus fondamentales nécessaires au développement des modèles indispensables à l'évaluation des données, des faisceaux d'actinides sont aussi nécessaires.

L'utilisation des faisceaux d'uranium délivrés au GANIL ainsi que le développement des futures installations du GSI (projet FAIR¹³) sont à cet égard particulièrement intéressants.

Il ne faudra pas non plus négliger la nécessité de disposer de cibles (couches minces) d'actinides bien caractérisées (épaisseur, homogénéité, composition chimique et isotopique) pour la réalisation des mesures sur accélérateur. En France, à côté du laboratoire de cibles de l'ILL (qui produit des cibles essentiellement pour ses besoins propres), CACAO (Chimie des Actinides et Cibles radioActives à Orsay) est l'une des rares installations actives dans la réalisation de telles cibles. La mise en place d'un réseau européen de laboratoires de fabrication et de caractérisation de cibles radioactives sera à cet égard importante à soutenir.



L'essentiel de l'attention de l'ANCRES sera donc concentré sur le transfert (depuis GEDEPEON) et l'approfondissement des thèmes prioritaires du Projet Fédérateur « Systèmes Nucléaires » du défi NEEDS de la mission interdisciplinaire du CNRS, ainsi que sur la pérennité (et l'optimisation) des moyens expérimentaux nécessaires à la poursuite des projets : accélérateurs français et européens ; réacteurs critiques et systèmes sous-critiques. Le retour d'expérience industrielle est également précieux, notamment le démarrage des cœurs et le suivi d'exploitation.

Les principaux thèmes techniques sont donc :

- **la théorie en physique nucléaire ;**
- **les mesures différentielles des sections efficaces** d'intérêt sur les isotopes prioritaires pour les applications. Il s'agit des actinides, des éléments constitutifs de caloporteurs, de matériaux de structure, en flux thermique ou rapide, sous rayonnement de spallation ou de stripping, ainsi que pour la fusion. Il s'agit également des sections efficaces pour les détecteurs et de spectrométrie gamma ;
- **les mesures intégrales** (dont celle de la puissance résiduelle) ;
- **les expériences sous-critiques ;**
- **les problèmes d'atténuation – propagation ;**
- enfin, **les accélérateurs multi-faisceaux** tels que JANNUS (couplés à la simulation : logiciels DART, SRIM, etc.), s'ils sont soutenus par les programmes de recherche de base sur les matériaux, contribuent de façon essentielle à assurer la « fermeture » de la connaissance des interactions rayonnement–matière nécessaire à la précision des couplages ultimes entre « neutronique » et matériaux pour atteindre l'objectif du cœur numérique. Il s'agit des matériaux sous flux neutronique (structures) et en fission (combustible) – ou sous flux neutronique de fusion afin de mieux dimensionner / utiliser les outils expérimentaux de la génération suivante – dont l'accélérateur IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) – avant DEMO (futur réacteur qui visera à démontrer la faisabilité industrielle de la production d'électricité par fusion).

3.5.3 DÉTECTEURS : DÉVELOPPEMENT DES CAPTEURS, DES DISPOSITIFS ; INTERPRÉTATION DE L'ACQUISITION ET SIMULATION ASSOCIÉE

Détecteurs in-core et ex-core : la simulation des détecteurs, sous ses divers aspects :

- la modélisation numérique (schéma de calcul pour la préparation des sections efficaces pour les calculs de cœur) ;
- la reconstruction du signal : problème de la validité de calcul/interprétation du signal dans le cadre des calculs de cœur pour les détecteurs in-core (reconstruction du spectre et du flux fin) et ex-core (validité des calculs de propagation, par exemple dans le cas d'un réflecteur épais, sujet lié à l'amélioration des données nucléaires).

Le calcul des détecteurs in-core et ex-core doit tenir compte de leur environnement et, si besoin, prendre en compte leur vieillissement ainsi que leur fiabilité, dans la reconstruction des incertitudes, par exemple dans la prédiction de l'enveloppe du point chaud.

¹³ FAIR : Facility for Antiproton and Ion Research

L'expérience Double Chooz, à laquelle contribue la collaboration CNRS-CEA sur l'expérience NUCIFER auprès du réacteur OSIRIS, est dédiée à la physique fondamentale des neutrinos. Elle possède également un volet non-prolifération, en permettant d'évaluer une limite de sensibilité de la méthode sur l'estimation des matières nucléaires présentes en cœur. L'AIEA s'intéresse au développement de cette technique, en particulier pour le suivi de certains réacteurs du futur, dans le concept de « *safeguards by design* ».

3.5.4 OUTILS D'ÉTUDES DE SCÉNARIOS NUCLEAIRES

Les études de scénarios nucléaires sont nécessaires pour évaluer de manière scientifique les différentes options concernant l'évolution du parc et des usines du cycle, à un horizon de 50 à 100 ans. Le code de référence est COSI (CEA), utilisé pour étudier en particulier le multi-recyclage, la transmutation, les transitions du parc nucléaire. D'autres besoins se font jour, dans une perspective *Open source*, ou pour des travaux académiques couplés à des études d'introduction de filière (Gen-4) ou d'évaluation de stratégie nucléaire.

Divers projets NEEDS associant, selon les cas, divers laboratoires du CNRS (SUBATECH, LSPC, IPNO), du CEA et de l'IRSN, contribuent :

- à développer, pour des études plus académiques que celles menées avec COSI, un outil de scénario électronucléaire CLASS (SUBATECH) ;
- à valider CLASS, ainsi que l'outil de scénario SDF (LSPC) centré autour du déploiement des réacteurs à sels fondus ; puis
- à introduire des options innovantes intégrant la sociologie, notamment pour l'étude de stratégies d'incinération, de sortie du nucléaire, d'utilisation du thorium ; et enfin
- à coupler l'analyse avec les scénarios de prospective énergétique.

4 THERMOHYDRAULIQUE

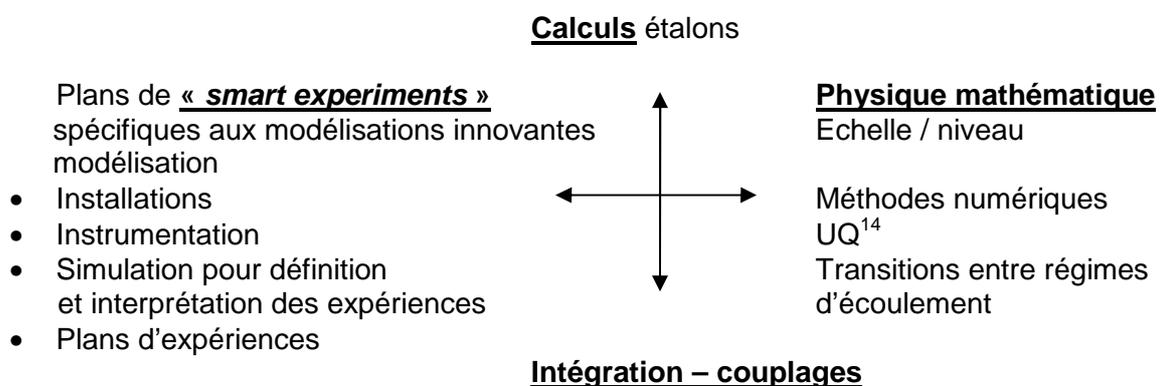
4.1 ENJEUX, MOTIVATIONS

L'évacuation sûre de la puissance, en situation normale ou accidentelle, les effets thermiques d'usure induits par les écoulements, les sollicitations mécaniques dues à l'interaction fluide-structure (IFS), dans les assemblages et les structures du cœur, dans les générateurs de vapeur, depuis le fonctionnement normal jusqu'aux situations extrêmes (séisme, etc.), montrent l'importance de la mécanique des fluides et de la thermohydraulique, en écoulements mono et multiphasiques, dans le dimensionnement et l'exploitation des réacteurs. Dans le cœur des réacteurs, la thermohydraulique est généralement couplée à la neutronique (à travers le coefficient de température, le coefficient de vide) et à la thermomécanique du combustible (à travers le coefficient Doppler, l'interaction fluide-structure, etc.).

Dans le cadre du projet de **cœur numérique**, en particulier, il faut élever la thermohydraulique au statut de discipline numérique multi-échelle capable de quantifier rigoureusement les incertitudes résultant de la modélisation et du calcul associé, seule ou couplée à d'autres disciplines dont la neutronique et la simulation du combustible. Il faut pour cela articuler modélisations et simulations numériques fidèles au modèle. Celles-ci seront fondées sur des calculs étalons validés par apport à des plans d'expériences adaptés et interprétables par le calcul, dits « *smart experiments* », alors même que le calcul ab initio est durablement impraticable, même en calcul intensif. La prédictivité des calculs opérationnels en conception, en exploitation, est de toute manière bornée par les incertitudes sur l'état du système calculé (par exemple : géométrie réelle, état des parois, pureté du fluide). A la différence de la neutronique, le changement d'échelle impose un changement de modélisation, en particulier en écoulement diphasique et au voisinage des parois, alors que les transitions de régime d'écoulement (carte des écoulements diphasiques) traversent plusieurs échelles.

L'objectif des progrès est de nourrir la prochaine génération de logiciels industriels à l'échelle « composant » (cœur, générateur de vapeur) qui doivent s'intégrer dans le projet de simulation du « cœur numérique » pour calculer le transfert thermique, l'interaction fluide-structure, l'optimisation de la conception des grilles, et qui doivent traiter les générateurs de vapeur. La modélisation des incertitudes de diverses natures vise à l'optimisation des ressources de calcul afin de minimiser l'incertitude globale du calcul multi-physique. Elle contribue à alimenter la discussion rigoureuse des marges à adopter en analyse de sûreté. Ce travail se conçoit en extension des travaux menés dans le cadre du partenariat NEPTUNE (EDF, AREVA, IRSN, CEA). Il lui emprunte des éléments de cahier des charges (voir en particulier ci-dessous la programmation expérimentale). Par ailleurs, il présente un intérêt plus large dans le cadre de la simulation multi-physique pour les énergies, en général.

Les projets de la feuille de route visent à accélérer les progrès en conjuguant les ressources expérimentales, en « physique mathématique », en calcul intensif (calculs étalons), en intégration et couplage, comme figuré ci-dessous.



4.2 THÈMES CLÉS EN ECOULEMENT MONO ET DIPHASIQUE

Transferts thermiques en paroi (monophasique et diphasiques turbulents à haut Reynolds, ou en écoulement lent, ou en stagnation ; à haute et basse pression ; pour des fluides divers : eau, sodium, gaz, sels fondus, plomb ...) ; à l'interface eau-vapeur, dans divers régimes d'écoulement diphasique, en priorité dans les conditions rencontrées dans le cœur et les GV, en situation normale et accidentelle. En paroi : ébullition dans ses différentes phases : nucléation, croissance, détachement, interaction entre bulles, film ; étude de la crise d'ébullition ; en cœur d'écoulement : interaction des bulles, coalescence, fragmentation, transition entre régimes diphasiques. Influence sur le transfert thermique, influence sur l'usure (effets thermiques/thermomécaniques).

Transfert d'impulsion, dans les mêmes conditions.

Interaction fluide–structures (vibrations, usures, séisme, fatigue...) : dans le cœur (assemblages combustibles), dans les générateurs de vapeur, dans les structures immergées : en conditions normales (mono et diphasiques) ; en conditions accidentelles ; en conditions naturelles extrêmes (séisme). Application en usure (vibrations), maintenance et durée de vie, en analyse de sûreté, en étude de conception de systèmes innovants.

4.3 VERROUS

Il s'agit de relever de grands défis de modélisation et de résolution numérique, afin d'accéder à une simulation validée, à incertitudes quantifiées et transposables. Le succès de ces grands défis rend à son tour possibles les applications clés identifiées dans les différents domaines de mise en œuvre.

¹⁴ UQ : Uncertainty Quantification, au sein de VV& UQ : quantification (justifiée) des incertitudes, encore mal maîtrisée dans de nombreux domaines

Le franchissement des verrous requiert un effort conjugué de modélisation, de simulation numérique rigoureuse, de validation expérimentale des modèles, puis de cas tests globaux représentatifs des difficultés applicatives opérationnelles. Ce franchissement nécessite la capacité de quantification des incertitudes, tant en validation expérimentale qu'en application aux systèmes industriels. Les deux domaines (expérimental et applicatif) sont généralement séparés par l'échelle, par le caractère plus ou moins extrême de la situation – pas toujours accessible expérimentalement – et par le poids des couplages multi-physiques. **Relever les grands défis suppose un effort de recherche amont, en particulier dans le domaine des écoulements diphasiques** (ébullition en paroi, crise d'ébullition, transitions entre régimes d'écoulement).

Cet effort doit permettre de **réaliser des calculs étalons précis, convergés, et validés « à incertitudes maîtrisées et transposables »**. Les grandeurs physiques essentielles pour le dimensionnement sont le transfert thermique et le transfert d'impulsion (résistance d'obstacles en circuit, amorçage et stabilité de boucles de circulation naturelle en grands espaces libres (« circuit virtuel » et simulation des grandes échelles en métaux liquides, interaction fluide-structure). Les principaux cas d'intérêt concernent :

- les écoulements monophasiques à haut Reynolds au voisinage d'une paroi d'état spécifié. Une authentique Simulation Numérique Directe (DNS) de la turbulence est nécessaire ;
- l'ébullition en paroi (d'état spécifié) : nucléation, croissance (ligne triple, microcouche (*microlayer*), projet ANR ALICE¹⁵ et extensions), détachement, interaction entre bulles et transfert au cœur de l'écoulement, depuis l'ébullition modérée, en géométrie radialement confinée (calandre de tubes en cœur ou en générateur de vapeur), jusqu'à la crise d'ébullition ;
- le comportement et l'interaction de bulles (domaine de phénoménologie – modélisation – simulation numérique baptisé DNS diphasique), turbulence diphasique, transition entre régimes d'écoulements diphasiques.

4.4 APPLICATIONS

Gen-2, Gen-3 : avec l'objectif de cœur numérique, et en cohérence avec l'étude des générateurs de vapeur des REP, la précision de la détermination des transferts thermiques et de l'interaction fluide-structure doit être améliorée, en toute situation de fonctionnement normal ou accidentel. Une application pilote spécifique est la modélisation physique de la **crise d'ébullition** (voir « actions » ci-après).

Génération-4 : RNR-Na (le problème se pose de façon semblable pour les **systèmes refroidis au plomb**) : thermohydraulique mono- et diphasique en sodium (ou plomb), **de la DNS turbulente à la simulation des grandes échelles**, à valider pour les métaux liquides. Par ailleurs, l'ébullition, son amorçage et son développement en milieu libre ou confiné, son couplage par contre-réaction neutronique à des transitoires de puissance, la valeur élevée (et très dépendante des conditions locales) de ΔT_{sat} , jouent un rôle majeur dans l'étude de transitoires dimensionnants.

Génération-4 : Réacteurs à sels fondus (cf. « actions » au § 4.5.6).

Fusion par confinement magnétique (cf. « actions » au § 4.5.3).

Enfin, transversalement hors nucléaire, **le solaire à concentration** combine de nombreuses difficultés précédemment évoquées. L'objectif est une augmentation significative du rendement compte tenu des hautes températures accessibles, à condition de mettre en œuvre un cycle de conversion efficace (caloporteur, système de conversion), de lisser les transitoires de production (capacité tampon) et de limiter les dommages dus aux transitoires thermiques.

¹⁵ Projet ANR ALICE (2009-2012) : Analyse Locale Instationnaire des mécanismes de la Crise d'Ebullition

4.5 ACTIONS À DÉVELOPPER ET COOPERATIONS

4.5.1 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL DE VALIDATION DES MODÈLES NÉCESSAIRES AU PROGRÈS (PRÉCISION, ROBUSTESSE) DES CALCULS DE CONCEPTION ET D'ANALYSE DE SÛRETÉ.

La définition des besoins émane de NEPTUNE (partenariat quadripartite EDF, AREVA, IRSN, CEA). Une réflexion sur l'actualisation des besoins expérimentaux est précisément en cours. Ces besoins incluent les installations expérimentales nécessaires aux expériences, **l'instrumentation innovante nécessaire** et accessible ou susceptible d'être développée et mise au point à temps. Ils concernent également les outils de calcul adéquats pour définir et surtout pour interpréter les expériences. Ces outils d'interprétation n'existent pas toujours.

L'évaluation des besoins en moyens expérimentaux à moyen-long terme en cours par le groupe de travail quadripartite mis en place fin 2012 s'articule autour des cinq thèmes suivants :

- la thermohydraulique et l'hydraulique assemblage combustible ;
- la thermohydraulique des générateurs de vapeur ;
- les études de circuits et la qualification des composants ;
- la thermohydraulique accidentelle ;
- la thermohydraulique avancée.

Les trois premiers thèmes sont en lien direct avec les besoins d'optimisation des composants du produit industriel. En ce sens, ils correspondent aux cibles et objectifs identifiés au § 4.1 de la feuille de route mais une difficulté intrinsèque réside en ce que ces installations « industrielles » sont souvent le siège de phénomènes couplés. La démarche de validation des modélisations nécessaires au progrès, telle que proposée, nécessite d'identifier les problématiques physiques sous-jacentes pouvant constituer des verrous du point de vue thermohydraulique. Par exemple, la crise d'ébullition et l'assèchement ou plus généralement les transferts thermiques sont des problématiques communes aux assemblages combustibles et aux générateurs de vapeur.

L'instruction actuellement menée par le groupe de travail a pour objectif d'identifier, dans une optique de mutualisation éventuelle, d'une part les moyens expérimentaux existants permettant de satisfaire les besoins de validation des nouvelles modélisations, et d'autre part les moyens expérimentaux complémentaires (y compris l'instrumentation fine) à associer à la démarche, car existant par ailleurs, ou à développer.



Les points clés présentant un enjeu dans le cadre ANCRE pourraient concerner l'instrumentation en particulier à hautes pression et température, en considérant également l'aspect transitoire rapide, et plus généralement les besoins d'acquisition des paramètres des modélisations et la validation de celles-ci (e.g la crise d'ébullition, les diverses modélisations pour tous régimes d'écoulement).

La réflexion en cours donne l'occasion d'un couplage fort entre le cahier des charges de NEPTUNE et la sollicitation du potentiel expérimental et théorique français et européen. En effet, il est probable qu'installations, instrumentation innovante et logiciels pour l'interprétation permettront d'optimiser les moyens présents au sein du partenariat quadripartite et dans les organismes de recherche académique.



4.5.2 RECHERCHE AMONT SUR LA MODÉLISATION PHYSIQUE DE LA CRISE D'ÉBULLITION

Du point de vue de la sûreté nucléaire, la crise d'ébullition est un phénomène d'une importance capitale. Elle prend place parmi les préoccupations majeures de NEPTUNE (coopération quadripartite EDF, AREVA, IRSN, CEA), de la fusion (refroidissement de la première paroi d'ITER, d'un démonstrateur), et joue un rôle important dans l'optimisation de systèmes énergétiques non nucléaires (solaire à concentration par exemple). Dans l'optique de déterminer les mécanismes physiques à l'origine de la crise d'ébullition, le projet ANR

ALICE (2009-2012) et ses suites visent en particulier à analyser si le mécanisme de pression de recul au niveau de la ligne de contact est pertinent et avéré dans différentes situations physiques. D'autres études se concentrent sur la « *microlayer* » séparant la base de la bulle de la paroi solide. Cependant, du fait de la complexité du problème, ces projets ainsi que leur extension programmée ne seront pas suffisants et un effort supplémentaire de recherche amont doit être poursuivi. Cette recherche à caractère fondamental doit allier l'acquisition de données expérimentales, le développement de modèles physiques et la simulation numérique. L'apport des cryogénistes, confrontés au même problème, sera précieux. Un couplage est indispensable entre NEPTUNE et les projets de recherche amont à définir et à lancer en s'appuyant sur une large fédération de compétences théoriques et expérimentales (instrumentation avancée).

4.5.3 FUSION PAR CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

Dans les concepts de modules tests de couverture (TBM) sélectionnés pour ITER, le caloporteur est l'hélium, avec une situation d'écoulement et d'échange le long de surfaces à chauffage instationnaire et totalement dissymétrique sur les deux faces. Par ailleurs, le cas du refroidissement à l'hélium est également d'intérêt pour la fission (réacteurs rapides de Génération-4 refroidis par gaz : RNR-gaz, réacteurs à haute température (HTR)).

La régénération du tritium est portée par l'alliage eutectique ${}^{17}\text{Li}$ - ${}^{83}\text{Pb}$ circulant lentement dans de forts champs magnétiques (variables). A terme, le même alliage eutectique peut, dans des concepts avancés, remplir à la fois la fonction de caloporteur (donc en écoulement plus rapide) et de fluide fertile et vecteur du tritium, accroissant l'importance des effets magnétohydrodynamiques sur l'écoulement, l'échange, et les interactions physico-chimiques à la paroi. Enfin, la question du refroidissement de la première paroi refroidie à l'eau et du flux critique associé (voir thème précédent) est crucial.

4.5.4 RECHERCHE AMONT TRANSVERSE EN MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES.

La thermohydraulique présente des difficultés de modélisation, de calculabilité rigoureuse (convergente, conservative, déterministe) et fidèle aux modèles. Elle est marquée par l'existence de fortes non-linéarités, de bifurcations, de non-séparabilité d'échelles caractérisées par des modèles différents. De ce point de vue, elle se situe aux antipodes de la « simplicité » du transport des neutrons et des photons gamma. L'importance des interfaces (paroi, eau-vapeur), le brusque changement d'échelle lors des transitions entre régimes d'écoulement, la grande dispersion des molécules dans l'espace des phases, l'impraticable ab initio dans les zones clés, transforment en grands défis la réalisation de calculs étalons pourtant nécessaires à l'interprétation d'expériences dans le but d'évaluer des incertitudes et de les transposer aux applications. Il est corrélativement difficile de définir des expériences productives (validation de modèle et réduction des incertitudes transposables). Ceci est vrai aux petites échelles en diphasique (cas des calandres serrées de tubes dans le cœur ou les générateurs de vapeur). C'est également le cas pour la prédictivité d'événements ou de qualités sensibles aux perturbations, aux grandes échelles (amorçage, blocage, redistribution de la convection naturelle).

De nombreux thèmes clés sont ouverts à une recherche amont en Mathématiques Appliquées :

- la correspondance : échelle – niveau de modélisation (voir par exemple l'approche locale de la crise d'ébullition) ;
- le raccordement d'échelles et ses modalités : depuis l'emboîtement / concaténation à la combinaison, en tenant compte de la traversée des échelles opérée par divers phénomènes (combustion), et rencontrée lors de divers événements (transition entre régimes d'écoulement diphasique) ;
- la cohérence des échelles à respecter dans la validation des modèles :
 - plans d'expériences analytiques et sous-structuration (effet « zoom ») ;

- capacité de restitution des paramètres clés du modèle à valider à partir de l'extraction/interprétation de la mesure de grandeurs pertinentes et accessibles ;
- capacité d'interprétation de l'expérience fine par un calcul induisant peu d'incertitudes, donc maîtrisant (calcul prédictif) la phénoménologie de l'expérience ;
- la calculabilité des modèles (convergence, conservation, déterminisme) ;
- la quantification des incertitudes (**supposant des calculs convergés**) et leur transposition aux applications opérationnelles aux caractéristiques éloignées de celles des expériences en termes d'échelle, de situation, de couplages ;
- la modélisation des incertitudes de diverses natures et leur combinaison (méthode statistique) engendrant une estimation globale multi-physique ; leur modélisation, combinée à l'analyse du retour d'expérience opérationnelle et complétée par des expériences spécifiques, permettra de les estimer et de borner leur plage de variation dans des conditions d'exploitation et des situations locales et instantanées données. Ceci constitue un gain potentiel significatif ;
- le développement de méthodes numériques fidèles et précises.

Investir un tel champ d'étude est typiquement l'objet du LRC Manon (ou d'autres à venir) récemment créé et en relation avec les équipes de plusieurs partenaires de NEPTUNE. Ce champ est ouvert à une plus large coopération, en particulier dans le cadre du Labex LaSIPS. Il s'agit d'opérer une rupture afin de conforter la thermohydraulique, telle qu'elle est rencontrée dans l'énergétique moderne, dans un statut de discipline numérique multi-échelle lui permettant d'être associée aux calculs fins d'autres physiques – en particulier la fission et la fusion – sans introduire des difficultés de principe spécifiques et dommageables : niveau d'incertitudes, transposition et méthodologie de quantification/transposition des incertitudes.



4.5.5 CALCULS ÉTALONS ET CALCUL INTENSIF

Le calcul intensif permet d'envisager, dans la décennie à venir, des calculs étalons (à valider par rapport à des **expériences spécifiques**) :

- en DNS turbulente monophasique à haut Reynolds au voisinage d'une paroi ;
- en DNS diphasique dans des conditions simplifiées et précisément spécifiées.



4.5.6 ETUDES D'ÉCOULEMENTS POLYPHASIQUES EN SELS FONDUS (BOUCLE EN CONVECTION FORCÉE FFFER)

Les sels fondus connaissent un regain d'intérêt, soit pour l'étude de **réacteurs à sels fondus** (filiale Gen-4), soit pour la conception de circuits intermédiaires, également pour les systèmes nucléaires de Gen-4, soit pour le transport et le stockage de la chaleur, par exemple pour des dispositifs solaires performants ou pour des réseaux de chaleur. Le projet FFFER (Forced Fluoride Flow for Experimental Research) est basé sur la nécessité de mettre au point un outil expérimental permettant à la fois la validation de développements ultérieurs de simulation hydrodynamique en milieu polyphasé (sels liquides, bulles et particules), et simultanément la mise au point d'une R&D axée sur la mise en œuvre de sels fondus fluorés à moyenne température (gamme 500 – 700°C). La température, l'impossibilité de visualisation directe ou d'utilisation de certains capteurs (fibres optiques par exemple) du fait de la chimie, conduisent à des développements spécifiques (ultrason, mesures électriques...).

4.6 STRUCTURATION DE L'EFFORT NATIONAL ET COOPÉRATIONS À DÉVELOPPER

Les principales expertises à mobiliser et à fédérer concernent :

- la modélisation avancée : ab initio, « DNS », « simulation des grandes échelles diphasiques » ;

- les mathématiques appliquées ;
- l'intégration logicielle et l'exploitation du potentiel du calcul intensif : grands défis numériques « exaflopiques » ;
- les dispositifs expérimentaux, l'instrumentation innovante et l'interprétation par la modélisation et le calcul (« smart experiments ») ;
- la magnétohydrodynamique pour l'étude des écoulements thermohydrauliques de métaux liquides ou sels fondus dans les tokamaks (couverture Li-Pb tritigène du réacteur ITER, pompage du sodium dans ASTRID, séparation magnétohydrodynamique (MHD) pour le retraitement en ligne du combustible liquide dans le réacteur à sels fondus) ou la co-extraction par procédé pyrometallurgique.

La liste des laboratoires parties prenantes, déjà impliqués ou prêts à s'associer, sert de base au rassemblement souhaité. Par exemple, dans les coopérations entre le CNRS et le CEA, sur des thèses ou des projets ANR (STI, ALICE), on peut citer : l'IMFT¹⁶, l'ESEME, le LMS¹⁷, l'IUSTI¹⁸, le LMFA¹⁹, l'IJRLDA²⁰, le TREFLE²¹, le LIMSI²², le LJLL²³, le LAGA²⁴, le CMAP²⁵, le SIMAP²⁶.

Par ailleurs, **une dynamique de rassemblement se met en place sur le plateau de Saclay**. Elle est porteuse de convergences en termes de programmes, d'analyse des besoins et de propositions scientifiques et techniques. Enfin, le LRC Manon devrait apporter une contribution majeure, du fait de la nature des problèmes posés par le statut de discipline numérique, impliquant une dimension déterminante de « physique mathématique ». Cette expression caractérise une approche spécifique de l'usage des mathématiques. Souvent, les mathématiques appliquées sont convoquées tardivement, par exemple au service de représentations par des systèmes d'équations aux dérivées partielles et de modèles, de lois de fermeture, établis préalablement, dans un contexte devenu habituel à la discipline. Or, et surtout dans l'approche multi-échelle (et a fortiori multi-physique), une refondation cohérente sur la base d'une théorie probabiliste de la prévision fondée sur la mesure (prémises indispensables à une logique des incertitudes) est nécessaire. Elle doit associer dès l'origine, sous peine d'incohérences et de graves défauts dans les solutions proposées :

- le cahier des charges de l'application, son besoin de prévisibilité (météo) ainsi que le niveau d'incertitudes associé, et l'analyse des obstacles éventuellement irréductibles pour une classe d'applications donnée (prévision « locale et précise » au-delà de n heures / jours) ;
- les phénomènes, leur observation, la puissance et les limites des mesures interprétables (à l'aide d'un modèle d'interprétation) et exploitables au profit de la précision du modèle opérationnel ;
- les classes et niveaux de modèles de représentation en fonction des échelles et des cinétiques, capables de tirer parti des mesures, de n'être pas contradictoires au niveau de leur raccordement, et d'être calculables (opérationnellement et rigoureusement). Par exemple, en thermique de microsystèmes nano-structurés, il convient de passer de l'équation de Fourier aux phonons et à la dynamique moléculaire. Les mêmes seuils existent dans la plupart des physiques impliquées (parfois on peut descendre à l'ab initio, parfois non), à l'exception des « équations

¹⁶ IMFT : Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

¹⁷ LMS : Laboratoire de Mécanique des Solides

¹⁸ IUSTI : Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels

¹⁹ LMFA : Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique

²⁰ IJRLDA : Institut Jean Le Rond d'Alembert

²¹ TREFLE : Laboratoire Transferts Ecoulements Fluides Energétiques

²² LIMSI : Laboratoire d'Informatique pour la mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

²³ LJLL : Laboratoire Jacques Louis Lions

²⁴ LAGA : Laboratoire Analyse Géométrie et Applications

²⁵ CMAP : Centre de Mathématiques Appliquées

²⁶ SIMAP : Laboratoire de Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés

parfaites » de Boltzmann et Bateman qui sont directement alimentées par l'ab initio des données (et modèles, à plus haute énergie – cascades, etc.) de la physique nucléaire. Elles sont essentiellement linéaires et sans niveau intermédiaire, leur régularité est protégée par la statistique élevée ;

- la proposition de classes de méthodes de résolution adaptées au traitement précis, fidèle, convergent, des modélisations adoptées. Les contraintes à respecter sont diverses :
 - performances (sur machines de grande diffusion ou en calcul intensif) ;
 - rigueur du calcul permettant la quantification des incertitudes (liées à la résolution), de leur propagation, de la transposition (depuis l'interprétation des mesures jusqu'à l'application opérationnelle). Cette qualité essentielle manque à des simulations existantes et constitue une menace à ne pas négliger dans la recherche de modélisations multi-échelles plus puissantes ;
 - capacité à utiliser les meilleures mesures interprétables (à l'aide d'un modèle *cohérent avec* – mais généralement *plus fin que* - celui du calcul applicatif) garantissant un gain de précision robuste et démontrable (ce qui n'est pas toujours le cas actuellement).

La physique mathématique ainsi considérée a eu sa source en physique fondamentale (en mécanique quantique et relativiste) et constitue un trésor de méthode pérenne. Des enseignements la réintègrent assez en amont (cursus bi-disciplinaire physique mathématique de licence à l'UPMC) et les équipes du LRC MANON et d'autres groupements en mathématiques appliquées doivent être encouragées à mettre en œuvre cette approche dès les premières phases de spécification des outils multi-échelles.

Des bénéfices collatéraux sont à en attendre dans la conception des installations expérimentales et de leur instrumentation, dans la définition des plans d'expériences, ainsi que dans la modélisation des diverses classes d'incertitudes, de leur évaluation en fonction de l'observation (état du système), du retour d'expérience en exploitation, d'essais spécifiques et de quelques calculs « extrêmes » à définir.

5 COUPLAGES (MULTI-PHYSIQUES) POUR LES ÉTUDES DE DIMENSIONNEMENT SÛRETÉ

5.1 ENJEUX, MOTIVATIONS

Les études nécessaires à la conception, à l'analyse de sûreté, à l'exploitation, utilisent des outils de simulation couplant les physiques concernées. Souvent, il s'agit d'enchaîner l'action de composants logiciels propres ou importés au sein d'une plateforme, voire de codes existants. Les outils correspondants (« codes », solveurs, plateformes) sont actuellement en cours de développement ou de qualification.

Une application essentielle est la physique du cœur des REL (Réacteurs à Eau Légère) existants et en projet, des REL innovants (dont les REL-HFC à Haut Facteur de Conversion) et des réacteurs de Gen-4, en particulier les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR-Na, RNR-gaz, RSF), des HTR et des ADS. Dans le cas des Réacteurs à Neutrons Rapides au sodium (RNR-Na), la prise en compte explicite et directe du couplage thermomécanique pour l'étude des transitoires impliquant des variations dimensionnelles des structures du cœur et de son supportage est considérée comme un progrès appréciable à mener à terme.

5.2 THEMES CLES

Les principales thématiques étroitement imbriquées sont :

- la maîtrise du couplage multi-physique ;
- la quantification et la maîtrise des incertitudes.

Les outils propres à ces thématiques et laissant espérer des progrès substantiels sont :

- la modélisation et les mathématiques appliquées (numérique, couplages, incertitudes) ;
- le génie logiciel ;
- le calcul intensif.

L'état des lieux fait apparaître une riche expérience de couplages concernant le fonctionnement nominal (calcul de flux couplé à l'évolution isotopique, avec un problème d'actualité : le calcul Monte Carlo évoluant – cf. § 3), mais aussi la plupart des transitoires accidentels hypothétiques dont les accidents de réactivité (projet HEMERA de l'IRSN avec le CEA), les accidents de brèche, de rupture de tuyauterie vapeur des REP, et bien sûr les accidents des RNR-Na dont les accidents hypothétiques menant à la fusion partielle ou étendue du cœur et à ses conséquences.

5.3 ACTIONS ET COOPÉRATIONS A DEVELOPPER



Couplage Thermohydraulique 3D / Neutronique 3D / Code Système

La capacité à modéliser des couplages multi-physiques revêt une importance particulière pour faire progresser la sûreté des réacteurs existants, notamment dans un contexte post-Fukushima. On ne va pas ici décrire toutes les problématiques liées à l'analyse de sûreté qui bénéficieraient de progrès dans ce domaine. **Le transitoire de Rupture d'une Tuyauterie Vapeur (RTV) avec perte des Groupes Motopompes Primaires (GMPP)** a été sélectionné car il pourrait servir, sur la décennie à venir, de jalon pour évaluer les progrès réalisés.

Ce transitoire est caractérisé par de très fortes dissymétries tant du point de vue de la thermohydraulique « système » et « cœur » que du point de vue neutronique. De plus, l'aspect tridimensionnel de la modélisation des écoulements (*downcomer* + cœur) est primordial pour la bonne représentativité de la physique d'un tel transitoire. En effet, la RTV avec arrêt des GMPP est caractérisée (du côté système) par l'annulation du débit dans les boucles saines : le cœur n'est alors plus alimenté que par la boucle affectée avec un débit faible (caractéristique de la décroissance de débit sur l'inertie de la GMPP). La modélisation 3D de l'écoulement dans le *downcomer* est alors nécessaire (ce qui n'est pas mis en œuvre à ce jour). Aussi, la répartition du fluide en entrée du cœur est calculée par des matrices de mélange, constantes tout au long du transitoire, ce qui ne peut constituer qu'une étape. Des « jeux » de matrices de mélange (fonction du débit boucle) semblent nécessaires à la bonne répartition du fluide en entrée du cœur.

Au niveau du cœur, les écoulements entrant en jeu sont très difficiles à modéliser : les vitesses massiques axiales en entrée du cœur étant très faibles, il existe d'importants débits transverses. De plus, du fait de la dissymétrie neutronique (calcul en configuration TGI-1 : Toutes Grappes Insérées sauf une), la puissance (et donc l'échauffement) sont très localisés dans le cœur ce qui provoque un effet « cheminée » et donc localement dans le cœur des inversions de débit. Il a été également démontré que la nappe de pression en sortie du cœur joue un rôle considérable sur la nature des écoulements et que la sensibilité est très importante : seulement quelques kPa sont suffisants pour observer des débits inverses en sortie du cœur.

Pour résumer, **la modélisation du transitoire de RTV avec arrêt des GMPP doit progresser considérablement** dans les domaines suivants :

- la modélisation 3D des écoulements dans le *downcomer* ;
- la prise en compte de matrices de mélange évoluant au cours du transitoire ;
- la simulation précise de l'effet « cheminée » dans le cœur et de la forte sensibilité des écoulements à la nappe de pression en sortie du cœur.

C'est également un défi pour la maîtrise des incertitudes. Cette raison peut conduire à choisir ce transitoire pour évaluer les progrès des méthodes d'estimation et de contrôle des incertitudes (voir chapitre 6).



Couplage du calcul Monte Carlo neutronique avec l'évolution du combustible, la simulation du combustible et la thermohydraulique (cf. § 3)

Les illustrations des progrès décisifs constituent des cas de « Grands Défis » physiques, numériques, de calcul intensif, à forts enjeux. Elles concernent le projet ASTRID et, plus largement, la plupart des concepts de Gen-4, ainsi que le dimensionnement de REL de diverses générations. Elles font partie des jalons majeurs de programmes à 3, 5 ou 10 ans. Les couplages interviennent également dans le développement des concepts de Réacteur à Sels Fondus de Gen-4 (par exemple dans le cadre du programme européen EVOL, projet coopératif Euratom – Rosatom qui a débuté en 2011), ainsi que dans les études du projet d'ADS MYRRHA.



Couplage magnétohydrodynamique (MHD) avec transferts de chaleur et de masse

Pour le dimensionnement des couvertures tritigènes dans le projet ITER, pour le développement de pompes électromagnétiques plus performantes, pour le refroidissement des boucles au sodium liquide (ASTRID), ou bien encore pour le développement de nouveaux procédés MHD d'extraction en sels fondus, il convient de lancer des études amont sur le couplage entre écoulements MHD et transferts thermiques ou chimiques. Peu de connaissances sont actuellement disponibles pour prédire les échanges de chaleur dans des boucles de métal liquide ou de sels fondus sous champ magnétique. L'interaction fine entre couches de Hartmann, couches parallèles et écoulements de cœur, laminaires ou turbulents, en présence de champs magnétiques d'intensités et d'orientations variables est également à étudier pour développer de nouvelles corrélations dans les projets ITER ou ASTRID. Par ailleurs, des actions récentes sont à prolonger sur la séparation chimique à une interface sels fondus / métal liquide en présence de champs magnétiques variables (interfaces agitées) ou continus (extraction « on line »).



Couplage entre calcul de neutronique et simulation du combustible (cf. § 3).

Divers niveaux de modélisation du combustible sont pratiqués. Les simulations associées sont plus ou moins prédictives, plus ou moins validées dans un domaine d'application défini, plus ou moins compatibles avec une allocation de ressources de calcul raisonnable dans un calcul couplé à incertitudes globales minimisées. Il s'agit d'**élever le niveau de la simulation numérique par rapport à l'état de l'art**, dans des classes de calcul prédéfinies (fonctionnement normal, incidents, accidents) et en cohérence avec les outils de conception-dimensionnement (« design ») et d'analyse de sûreté utilisés ou en développement. **Une validation expérimentale approfondie devra être entreprise**, en particulier dans le domaine du retour d'expérience (REX) industriel, pour le fonctionnement nominal, en séparant les paramètres et leurs effets, et en interrogeant les compensations éventuelles (existantes, détruites) avec les autres physiques impliquées dans le couplage – en particulier la neutronique, d'où le positionnement de l'action.

L'enjeu est l'optimisation du niveau de modélisation – simulation numérique pour une classe donnée de problèmes à résoudre (le choix d'une classe prioritaire de situations à traiter étant à réaliser en amont).



Couplage avec la thermohydraulique en maîtrisant les incertitudes globales (cf. § 4 et 6).

Ce thème a plusieurs champs d'application : couplage à la circulation naturelle dans des espaces étendus, thermohydraulique diphasique avec ébullition dans le cœur, couplage fluide – structure (sous vibrations, dont séisme, ou sous dilatation de structures). Plusieurs aspects sont représentés dans **le calcul avancé d'un ULOF (Unprotected Loss-Of-Flow : accident non protégé de perte de débit) dans un RNR-Na de type intégré**. Ce calcul constitue un grand défi vers 2020 pour le projet ASTRID.

Par ailleurs, d'autres transitoires plus locaux, tels que le défaut local de refroidissement dans le cœur par bouchage dans un assemblage, le passage hypothétique de gaz à travers le

cœur, posent des problèmes de couplages multi-physiques et d'évaluation des incertitudes qui méritent d'être approfondis.



Impact sur la sûreté d'un suivi de charge à plus haute fréquence

En France, les centrales nucléaires font du suivi de charge (la puissance délivrée s'adapte aux fluctuations de la demande du réseau) et du soutien de fréquence ; elles ont des facteurs de charge de l'ordre de 80%. Le recours à un suivi de charge à plus haute fréquence sera nécessaire pour une gestion optimisée de l'intermittence des énergies renouvelables non programmables (solaire, éolien). La flexibilité et la réactivité du parc nucléaire devront accommoder non seulement les variations de la demande, mais également les fluctuations des énergies renouvelables intermittentes qui pourront, en été, imposer le quasi-effacement de la base suivi d'une reprise de charge à forte pente. Ces transitoires mettent le cœur et divers composants du système à l'épreuve, et l'étude d'impact sur la sûreté est un enjeu important. Cette problématique s'inscrit dans les objectifs de R&D des couplages multi-physiques pour la sûreté. Elle nécessite un effort coordonné des différentes thématiques.

6 INCERTITUDES

6.1 ENJEUX, MOTIVATIONS

Le travail de recherche que nous proposons vise à mieux intégrer les progrès réalisés par les outils de simulation dans **une perspective d'aide à la décision**. Plus précisément, il s'agit de formaliser la modélisation de la connaissance et d'explicitier ainsi les hypothèses de représentation intervenant dans les études de comportements de systèmes nucléaires à valider.

La prise de décision optimisée suppose une modélisation rigoureuse de ces phases de transcription de connaissance permettant d'**évaluer les incertitudes associées aux résultats et le degré de confiance accordé par des experts à cette quantification**. Les enjeux industriels sont considérables car c'est l'ensemble des processus d'allocation des ressources qui est concerné :

- En conception de systèmes énergétiques et en optimisation de l'exploitation, il s'agit de déterminer les performances (en capacité de puissance, durée de vie, disponibilité) et les coûts (dont les coûts d'exploitation – maintenance, de démantèlement) dans le respect des contraintes (de nature sanitaire, environnementale, etc.).
- Dans le domaine de la simulation, l'allocation des ressources en développement, en validation expérimentale, dépend de la réduction espérée des incertitudes et des marges. Toutes les incertitudes ne sont pas « réductibles » et, dans ce cas, les efforts doivent viser à améliorer leur modélisation.

L'évaluation des incertitudes est au cœur du processus V-V & UQ (Verification – Validation & Uncertainty Quantification) qui sous-tend la confiance accordée à la mise en œuvre de la simulation numérique, dans un nombre croissant de domaines d'application industrielle.

Le calcul intensif est à la fois un outil essentiel et un objet d'application de la démarche de quantification et de contrôle des incertitudes car :

- le calcul intensif est un atout décisif pour le progrès en évaluation et en transposition des incertitudes ;
- l'allocation raisonnée des ressources de calcul (en conception ou en temps réel en ligne) requiert une minimisation active (options de calcul et de schématisation du système calculé) des incertitudes résultantes, sous contraintes de ressources. C'est

l'objectif d'un projet global de supervision voire d'automatisation de résolution de problème (cf. §7).

Il est également nécessaire de savoir définir les domaines où, par nature, une borne supérieure utile sur les incertitudes ne peut pas être déterminée, ce qui conduit à un nécessaire contournement dans le processus de conception ou dans le processus d'exploitation (souvent accompagné alors d'un rôle accru de l'instrumentation et du calcul en ligne). Certains déroulements d'accidents graves, des processus chaotiques, des effets de bifurcations aux conséquences critiques, relèvent de cette thématique.

Cette thématique est présente dans des domaines concernant le stockage de déchets radioactifs, la fusion par confinement magnétique, le climat et l'environnement et dans l'étude de scénarios prospectifs (par exemple : les études technico-économiques sur l'énergie (EDDEN²⁷ au CNRS, I-tésé²⁸ au CEA, etc.)).

Toutefois, la physique des réacteurs, avec le couplage multi-physique et ses fortes non-linéarités affectant des paramètres clés, sources d'incertitudes dans les situations d'intérêt, est :

- prioritaire pour la mise en œuvre des progrès méthodologiques et algorithmiques ;
- en pointe dans le support au développement et aux applications pilotes de démonstration.

Ces applications pilotes concernent aussi bien les réacteurs de Gen-2, Gen-3 et Gen-4.

Les éléments de motivation décisifs tiennent aux progrès réalisés :

- dans la définition d'une méthodologie « *top down* » ;
- dans la mise au point et la démonstration d'algorithmes et d'outils statistico-numériques qui ont récemment pris leur essor grâce au calcul intensif qui les met aujourd'hui en mesure de traiter des problèmes du monde réel.

6.2 THÈMES CLÉS

6.2.1 UN EFFORT MÉTHODOLOGIQUE

Pour déterminer avec rigueur et précision les marges (i.e. intégrer l'état réel des connaissances), **le développement de méthodes formelles de représentation et de traitement des connaissances s'avère nécessaire**. Les développements réalisés en statistique, en intelligence artificielle et en recherche opérationnelle ont permis l'émergence de nouvelles méthodes et d'outils permettant un traitement différencié des incertitudes suivant leur nature (incomplétude ; imprécision ; aléa). Cependant, même si les méthodes et outils développés ont montré leurs qualités opérationnelles à travers quelques applications, leur emploi reste en général très limité. Ceci tient en premier lieu à la nécessité d'une **interaction forte entre spécialistes du traitement de la connaissance et experts « métier »** pour une évaluation correcte des incertitudes qui nécessite d'adapter ces méthodes à leur domaine d'utilisation. A cette difficulté peut s'ajouter également la barrière opérationnelle de mise en œuvre des calculs (ressources en moyens matériels et logiciels, élaboration assistée ou automatique de protocoles de calcul).

6.2.2 UNE APPROCHE « TOP DOWN »

A la base de la démarche se situe l'analyse des sources d'incertitudes, de leur nature et de leur fonction dans le processus de décision. Il s'agit d'un processus « top down » dont l'efficacité suppose, en amont des méthodes et outils techniques, une méthodologie permettant d'**explorer convenablement le « labyrinthe décisionnel »**. Des éléments de doctrine ont été édictés sur le thème des incertitudes, mais la mise en œuvre opérationnelle des évaluations reste du domaine d'un rapport dialectique entre les acteurs opérationnels et

²⁷ EDDEN : Economie du Développement Durable et de l'Energie

²⁸ I-tésé : Institut de technico-économie des systèmes énergétiques

les autorités qui les contrôlent. Le débat est en cours dans le nucléaire et les avancées dépendent des disciplines (et, au-delà, de leur couplage).

Cette analyse est essentielle pour identifier les possibilités de réduction démontrable des incertitudes ainsi que les limites associées. Elle est accompagnée de l'étude des fonctions que jouent ces incertitudes dans l'optimisation ultime des systèmes. Ce rôle dépend des possibilités et des devoirs de rétroaction du concepteur et de l'exploitant : changement de design, mise en place d'instrumentation complémentaire, adaptation de procédures. La formalisation du processus permettrait de boucler clairement l'optimisation en explicitant, en retour, l'impératif et les marges disponibles du concepteur.

Etablir un programme de R&D transverse (méthodes, outils) et d'applications pilotes illustrant les besoins de projets prioritaires, est l'objectif de la démarche proposée. Cette démarche implique un lien étroit avec les groupes de travail thématiques concernant :

- les physiques associées dans la simulation (et leur couplage) : neutronique, modélisation du combustible, thermohydraulique mono- ou diphasique, matériaux et thermomécanique des structures, chimie ;
- les mathématiques appliquées : statistique, intelligence artificielle, recherche opérationnelle ;
- le calcul intensif (à la fois en tant qu'outil et en tant qu'application pilote) ;
- l'instrumentation et sa modélisation.

6.3 VERROUS

Il s'agit principalement de transposer les résultats issus des progrès sémantiques et algorithmiques en modélisation de la connaissance. Cela suppose des progrès majeurs dans les domaines suivants, afin de renforcer la rigueur d'utilisation et la précision des outils algorithmiques :

- une démarche globale : analyse et remontage des sources d'incertitudes incluant les « boucles » (par exemple : part de la modélisation – simulation dans l'instrumentation et dans l'interprétation des mesures) ; analyse de la connaissance experte, intégration dans un processus de type bayésien ;
- les modélisations des incertitudes, la transposition et la combinaison d'incertitudes ;
- la réduction d'incertitudes par utilisation de plans d'expériences analytiques à effets et échelles séparés ;
- l'utilisation de modèles globaux de l'espace des paramètres de modélisation (méta-modèles, surfaces de réponses, réseaux probabilistes), en particulier en substitution économe à la simulation directe massivement répétitive ;
- la modélisation probabiliste, permettant l'estimation de quantiles extrêmes – en queue de distribution, événements rares, l'utilisation de méthodes de réduction de variance des estimateurs ;
- la modélisation inverse : pour identifier les limites de sûreté dans l'espace des paramètres contrôlés ;
- la recherche des configurations de risque maximal de sûreté : pour assister l'expert dans sa recherche des situations problématiques ;
- l'agrégation multicritère pour formaliser l'importance des différents enjeux sous-jacents aux choix opérés par les experts dans leur transcription de connaissance ;
- le calcul intensif permettant l'optimisation assistée ou automatique de protocoles de calcul multi-échelles et multi-physiques (le programme détaillé constitue le corps d'un projet de supervision de la simulation numérique).

6.4 APPLICATIONS PILOTES ET DÉMONSTRATIONS

La recherche proposée est une approche « métier » en ce sens que l'idée est de partir d'applications pilotes pour développer des méthodes d'aide à la décision pour des systèmes complexes. Ces applications peuvent se regrouper en deux catégories :

6.4.1 - APPLICATIONS PILOTES PAR DISCIPLINE

Trois types d'actions pilotes peuvent être retenues :



- neutronique : Couplages Monte-Carlo / Déterministe ; évaluation des incertitudes induites par les données nucléaires sur les calculs de dimensionnement ; évaluation des incertitudes liées à la modélisation numérique et aux différents schémas de calculs ; estimation des marges à la criticité, identification des zones critiques de sûreté ;



- thermohydraulique : développement d'indicateurs multicritères associés aux grandeurs de sûreté : marge au flux critique, incertitudes en cas d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) ;
- couplages multi-physiques : développement de systèmes experts (systèmes à bases de connaissances) prenant en compte les interactions entre phénomènes sur différents scénarios accidentels.

6.4.2 - APPLICATIONS PILOTES PAR CLASSE DE SYSTÈMES

Ces applications s'appuieront sur les résultats obtenus lors des applications par disciplines. En effet, l'évaluation d'un système nucléaire de type Gen-2, Gen-3, Gen-4 en termes de sûreté et de performance nécessite d'intégrer l'ensemble des connaissances spécifiques aux différentes disciplines et les outils de modélisation et de transformation de connaissances qui y sont associés :



- Réacteurs à eau légère de Gen-2 et Gen-3 : durée de vie, maintenance, durée de vie des cuves, usure, vieillissement, remplacement ; optimisation des performances : connaissance de la distribution de puissance dans le cœur, marge au flux critique ; plus généralement : précision de la reconstruction de l'état du cœur en fonctionnement ; puissance résiduelle ; analyse d'accidents : APRP ; RTV ; etc.

Le traitement de la RTV constitue un cas exemplaire du fait de la profondeur (amplitude, non-linéarité) et de la complexité des couplages (en termes de physiques, d'espace et de temps) qui représentent un défi pour la quantification des incertitudes (moins pour celle de leur enveloppe). Cette application pilote est présentée en détail au § 5 (au titre des couplages) mais elle doit faire l'objet d'une action associée spécifique au titre des incertitudes ;



- Réacteurs de Gen-4 : étude des accidents dimensionnant (ex. : ULOF (perte de débit non protégée) en RNR-Na, blocage de débit, retrait intempestif d'absorbants de contrôle, passage de gaz à travers le cœur) ;
Le commentaire fait pour Gen-2 et Gen-3 vaut pour le traitement approfondi des incertitudes dans le cas (présenté au § 5) du traitement de l'accident ULOF sur un RNR-Na (Gen-4) ;
- Pour tout type de réacteur : évolution et conséquences des accidents graves (voir Fukushima), etc.

Dans le cadre du projet global, l'évaluation et la minimisation des incertitudes constituent l'aboutissement de tous les grands défis dont l'étude est programmée à 3, 5 ou 10 ans. C'est dans l'illustration associée à ces jalons que s'exprimeront les progrès en maturité et en efficacité réalisés grâce aux travaux sur la thématique des incertitudes.

6.5 ACTIONS

Pour définir des méthodes formelles de validation des simulations dans le domaine de la physique des réacteurs, il conviendra de voir comment les développements théoriques menés en représentation et en traitement de la connaissance pourraient être repris. Une première action dans ce sens a été engagée par l'IRSN lors d'un exercice d'inter-comparaison des méthodes d'évaluation de la qualité des résultats de simulations d'accidents de réacteurs nucléaires. Cet exercice (programme OECD/CSNI BEMUSE) auquel ont participé une quinzaine d'instituts de sûreté a montré l'intérêt du formalisme pour identifier les cohérences et les conflits entre les prédictions issues des différents instituts.

Aussi, deux nouvelles actions de recherche sont proposées : l'une portant sur les méthodes d'évaluation et de fusion de l'information et l'autre sur l'utilisation des simulations en support à la décision. Ce programme de recherche a pour objectif global d'accroître l'apport des connaissances acquises en termes d'utilisation opérationnelle.

6.5.1 MÉTHODES D'ÉVALUATION ET DE FUSION D'INFORMATION

L'idée de cette recherche est de s'appuyer sur des inter-comparaisons de simulations permettant d'identifier et de quantifier l'effet de transcriptions différentes d'un même problème au travers des choix de modèles (neutronique, comportement du combustible et thermohydraulique), de la disponibilité et de la qualité des données. Dans cette action, nous proposons de poursuivre l'effort de recherche sur la transposition des concepts de justesse et de fidélité utilisés en métrologie pour évaluer la qualité d'une mesure à l'évaluation d'informations plus complexes comme un avis d'expert ou un résultat de simulation. Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux de Roger Cooke (Delft University of Technology) et de la collaboration de l'IRSN avec Didier Dubois (Institut de Recherche en Informatique de Toulouse) sur les méthodes de représentation et de traitement de la connaissance.

Les théories de l'incertain (probabilités, probabilités imprécises, théorie de Shafer...) proposent des modèles de représentation de connaissance qui permettent de représenter des sources d'information de nature différente (variabilité, imprécision, incomplétude) et de qualité variable (e.g. source fiable). Cependant, on ne dispose pas de théorie générale qui nous permette de comparer la qualité d'informations de natures différentes et d'aboutir à un opérateur optimal de synthèse de ces informations : le choix d'un tel opérateur est nécessairement un compromis entre un objectif de précision (ne retenir des informations que leurs points communs pour diminuer l'incertitude des évaluations) et un objectif de prudence (ne pas négliger totalement une information conflictuelle avec les autres). Le résultat attendu de cette recherche est le développement de principes généraux de représentation et de synthèse des informations permettant d'élaborer une évaluation robuste de l'incertitude associée aux évaluations d'un système nucléaire. Les applications prévues nécessiteront de formaliser les connexions entre les informations provenant des données et celles des experts, et permettront de montrer le caractère générique des développements réalisés. Pour atteindre cet objectif, cette recherche sera menée en étroite collaboration avec les autres thématiques.

6.5.2 MÉTHODES D'UTILISATION DES SIMULATIONS EN SUPPORT À LA DÉCISION

Les différents programmes : neutronique, thermohydraulique, et couplages, soulignent la complexité des phénomènes à modéliser ainsi que les nombreuses données nécessaires à leur utilisation. Des événements récents (notamment la catastrophe de Fukushima) ont mis en évidence le rôle des modèles et des simulations numériques dans les processus de décision. Il est donc important, en particulier s'agissant de modèles utilisés en support à l'analyse de risque, d'intégrer les incertitudes dans les résultats des simulations et de positionner leur utilisation dans une recherche d'opposabilité. Ainsi, si des résultats de simulations sont utilisés pour recommander telle ou telle action, il est essentiel d'identifier et de définir les règles que le modélisateur et l'utilisateur doivent respecter. Cela impose une formalisation qui, par nature, ajoute de la transparence quant aux objectifs et aux critères considérés par les experts dans leur appréciation.

Un premier objectif de cette recherche est de développer une méthodologie robuste de propagation des incertitudes qui puisse permettre à un ingénieur de sûreté, non forcément spécialiste des théories de l'incertain (probabilités, *P-Boxes*²⁹, possibilités ...), de pouvoir encoder et propager de manière rigoureuse les incertitudes « source » et ainsi de connaître la précision associée aux résultats des simulations. Pour son utilisation pratique, il est important qu'un modèle d'aide à la décision soit inversible, tel qu'un méta-modèle de type réseaux bayesiens, qui permet de représenter des connaissances de nature structurelle et statistique dans un formalisme unifié : « à chaque probabilité de valeur d'entrée est associée une probabilité de valeur de sortie » utilisable en mode direct (« pronostic ») ou inverse (« diagnostic »).

Un autre objectif concerne la conception de stratégies de calcul (parcimonieuses en nombre – et en sophistication – de simulations) pour répondre à une problématique d'expertise de sûreté macroscopique globale, telle que l'identification des limites de sûreté, ou la recherche des configurations de risque maximal. Cet objectif pose également un enjeu technique de calcul intensif, car la mise en œuvre de ces solutions algorithmiques repose sur une infrastructure de calcul compatible, tant d'un point de vue ergonomique pour l'utilisateur, que du point de vue programmatique pour la recherche/développement. Les outils mathématiques sous-jacents à cette action sont les plans d'expériences numériques, les surfaces de réponses, les modèles inverses, l'optimisation globale.

6.6 STRUCTURATION DE L'EFFORT NATIONAL ET COOPÉRATIONS À DÉVELOPPER

La modélisation des incertitudes et leur prise en compte, notamment dans la détermination des marges de sûreté, soulèvent deux difficultés : l'une méthodologique se rapportant à la thématique « incertitude et aide à la décision », et l'autre technique regroupée dans la thématique « incertitudes et codes de calcul ». Ces deux aspects de la modélisation des incertitudes ont été abordés préférentiellement dans les disciplines académiques. **Ainsi, l'aspect plus méthodologique « incertitude et aide à la décision » s'est développé dans les sciences de l'information et du management, alors que l'aspect plus technique a été approfondi essentiellement par les statisticiens et numériciens.**

Ces thématiques regroupent une communauté scientifique et industrielle française particulièrement active, incluant, entre autres, les acteurs suivants :

- l'IRIT (Institut de Recherche en Informatique de Toulouse) ;
- le LAMSADE (Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision), laboratoire de l'Université Paris-Dauphine associé au CNRS ;
- le laboratoire, HEUDIASYC (HEUristique DIAgnostique des SYstèmes Complexes), à l'UTC ;
- le GdR MASCOT-Num (Groupement de Recherche Méthodes d'Analyse Stochastique pour les Codes et Traitements Numériques) du CNRS, qui, outre son activité d'animation scientifique internationale propre, est un relais des différents réseaux institutionnels et se spécialise en plusieurs projets de structure et de thématiques diverses, parmi lesquels :
 - GTII, Groupe de travail Incertitudes et Industrie de l'Institut de Maîtrise des Risques ;
 - GFI, Groupe Fiabilité et Incertitudes de la Société Française de Statistique ;
 - Projet ANR OPUS, Open source Platform for Uncertainty treatment in Simulation ;

²⁹ P-Box : Permutation Box

- Projet ANR COSTA BRAVA, Complex spatio-temporal dynamics analysis by model reduction and sensitivity analysis ;
- Groupe Incertéo du RTRA Digiteo Labs ;
- Consortiums industriels-académiques DICE/ReDICE “Repet Deep Inside Computer Experiments” ;
- Réseaux institutionnels :
 - MEXICO (Méthodes pour l'EXploration Informatique des modèles COMplexes) ;
 - IMPEC (réseau CEA Incertitudes, Métamodèles et Plans d'Expériences pour les Codes de calcul) ;
 - Cluster Environnement Rhône-Alpes ;
 - Pôle SYSTEMATIC IdF ;
- Autres GdR : Maths-entreprises, ondes ;
- Institutions homologues étrangères : MUCM (UK), SIAM (USA) ;
- l'AMIES (Agence pour les Mathématiques en Interaction avec l'Entreprise et la Société), initiative de l'Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs interfaces (INSMI) du CNRS.

Le GdR MASCOT-Num n'a pas de rôle « hiérarchique » vis-à-vis de ces projets. Il sert de forum comme « vecteur de coordination ».

Le transfert opérationnel des éléments de doctrine établis par la R&D se réalisera sous forme d'environnements de modélisation (PROMETHEE, SUNSET, URANIE, OpenTURNS) qui les rendront accessibles à l'ingénierie.

Toutefois, des obstacles doivent être franchis :

- la formation scientifique - parfois lacunaire sur ce thème - doit être renforcée, d'une part au sein des effectifs en activité, mais aussi dans les cursus d'enseignement d'ingénierie et universitaires ;
- les contraintes techniques - et plus particulièrement informatiques - ne doivent plus être bloquantes dans la mise en œuvre quotidienne des projets, ce qui implique la généralisation des capacités de calcul intensif pour tous les acteurs opérationnels, ainsi que l'amélioration ergonomique des outils existants.

7 PLATEFORMES LOGICIELLES : INTEGRATION DE LA SUPERVISION ET DU CALCUL INTENSIF : DU CALCUL VERS LA RÉOLUTION DE PROBLÈME

Le travail productif concernant ce thème très transverse ne sera que partiellement accompli au sein de la communauté de physique des réacteurs. Il sera naturellement traité au travers des partenariats associés mis en place au plus près des actions de développement et d'industrialisation. Mais l'aboutissement de ces travaux est essentiel au succès des projets ANCRE proposés dans les paragraphes précédents. La communauté de physique des réacteurs doit alors disposer à temps des outils et de la puissance de calcul bien conditionnée et instrumentée en fonction de ses besoins spécifiques.

7.1 L'INTÉGRATION DU POTENTIEL DES PLATEFORMES LOGICIELLES GÉNÉRATRICES ET DE CELUI DU CALCUL INTENSIF : ENJEUX ET MOTIVATIONS

Les domaines de simulation de la physique des réacteurs, de la science des matériaux, de la fusion et de la chimie sont avides de puissance de calcul à la fois pour la simulation « directe / haute-fidélité » (au plus près des phénomènes élémentaires), comme pour les applications

opérationnelles (optimisation en dimensionnement, gestion de crise...). Ces dernières sont intégrées dans un processus d'évaluation – minimisation des incertitudes le plus souvent abordée par une approche probabiliste. De plus, de telles applications seront de plus en plus intégrées au service de raisonnements de type diagnostic ou génération de plans d'actions qui sont sensibles à l'explosion combinatoire. Ces raisonnements constituent un troisième étage au-dessus du calcul direct puis de la simulation numérique optimisée : celui de la **résolution de problèmes automatisée ou assistée**, champ déjà exploré dans les années 1980 et bénéficiant depuis du progrès des plateformes de supervision ainsi que du calcul intensif.

L'importance en terme de besoins en ressources numériques (nombre d'opérations numériques / logiques) peut s'exprimer par le produit des trois termes suivants : le calcul de base \times le nombre de calculs pour l'évaluation probabiliste des incertitudes \times le nombre de simulations nécessaire à l'animation des scénarios de diagnostic ou de plans d'actions. Le génie logiciel arrive de ce fait à un nouveau carrefour. La perspective d'une utilisation intelligente, en termes coûts / bénéfiques, de calculs requérant plus de 10^{25} opérations flottantes, conduit au-delà de la capacité « exaflopique » dont la mise en œuvre pratique suppose déjà la résolution de beaucoup de problèmes difficiles.

La puissance du calcul intensif, à laquelle sont associées des contraintes logicielles et numériques spécifiques, peut-elle être combinée à la flexibilité, à l'efficacité et à la fiabilité assurées à travers les services rendus par les plateformes logicielles génératrices détaillées ci-dessous ?

Par exemple, les simples notions de portabilité et de scalabilité changent de dimension avec l'apparition du calcul intensif et de ses diverses composantes. De fait, l'intégration des deux potentiels (celui - longtemps attendu - des plateformes génératrices et celui du calcul intensif) est impérative.

7.2 LES NÉCESSAIRES PROGRÈS DU CALCUL INTENSIF ET L'INTÉGRATION DES PLATEFORMES LOGICIELLES GÉNÉRATRICES

Une plateforme génératrice est un logiciel généralement doté d'un langage de commande et d'une représentation centrée objets (mettant en œuvre en particulier des langages orientés objets), qui permet :

- d'engendrer à partir de composants intégrés ou externes (en « plug and play » pour les composants « boîte noire ») des « codes de calcul » (voire une famille de codes de calcul opérationnels) consacrés à la résolution d'une classe de problèmes donnée :
 - nature phénoménologique (mono ou multi-physique : couplages) et énoncé du problème ;
 - identité et caractérisation des systèmes physiques étudiés ;
 - champ de variation des paramètres clés assurant la validation et la maîtrise d'incertitudes quantifiées.
- d'engendrer directement tout protocole de calcul nécessaire à la résolution d'un nouveau problème par l'exécution d'un calcul (multi-physique, multisystème) dont le protocole doit être développé et vérifié à l'intérieur du cadre de la plateforme elle-même. La possibilité de benchmarks par substitution aisée de composants (solveurs, bases de données) fait partie des atouts de telles plateformes.

La plateforme doit progressivement être enrichie :

- d'outils de pré et de post-traitement ;
- d'outils de propagation, d'évaluation, de minimisation d'incertitudes ;
- d'outils d'aide à la résolution de problèmes intégrant des jugements d'experts et des heuristiques :

- aide à l'interprétation (interprétation d'expériences, diagnostic incidentel en exploitation) ;
- aide à la génération assistée/automatique de protocoles de calculs, de plans d'actions (exploitation).

Ces enrichissements définissent trois niveaux de plateformes qui sont évoqués ci-dessous. Leurs capacités se rapportent aux trois étages correspondant aux trois niveaux de la résolution de problème :

- **Au premier niveau se trouve la réalisation du calcul brut**

Un protocole de calcul intègre toutes les décisions et les commandes nécessaires à la réalisation : schématisation, maillages pour les différentes disciplines, couplages, enchaînement d'actions d'opérateurs sur des structures de données. Cette procédure nécessite, comme dans certains ateliers avancés de génération de simulateurs et comme dans certaines plateformes de génération de systèmes à bases de connaissances, la combinaison d'une représentation centrée objet et d'un langage de commande. Elle fonctionne sur le modèle de la génération de plans d'actions, qui permet l'automatisation d'une partie ou de la totalité de l'écriture du protocole. C'est une étape vers la programmation automatique, dans un domaine de connaissances et de données borné et sans ambiguïté sémantique. Ce modèle s'applique en études, en génération de procédures (de sûreté, par exemple), en « *real time decision algorithms* ».

- **Le deuxième niveau concerne la propagation, l'estimation, la minimisation des incertitudes résultantes, sous contrainte de ressources de calcul.**

Il peut intégrer des avis d'experts. Il s'agit de l'objectif ultime du calcul. Son atteinte rapide et sûre est encore plus importante dans les applications en temps réel : on l'a vu dans les groupes de travail suivant l'accident de Fukushima en ligne, à l'aide de calculs simples, lorsque l'arbre du calcul ne cache pas la forêt des objectifs opérationnels et l'analyse de valeur associée. Ceci rappelle l'importance, pour l'aide à l'évaluation (études), pour l'aide à la décision (accidents, centres techniques de crise), pour l'enseignement, de modèles simples permettant d'encadrer, de contrôler, de piloter les modélisations raffinées.

Les capacités complémentaires sont celles de l'évaluation des incertitudes, des biais et de l'optimisation multicritère.

- **Le troisième niveau est celui de la résolution de problème (assistée ou automatique).**

Il s'agit :

- de la réalisation d'un seul tenant d'un dossier d'études récurrent sur un objet / système connu (optimisation d'un rechargement, étude de compatibilité pour des assemblages prototypes, « *uprating* » exigeant la reprise d'études d'accidents, etc.). Le modèle de génération de plans d'actions (voir ci-dessus) convient ;
- de l'interprétation d'expériences, accompagnée de la validation de la simulation et de ses modèles, de la quantification et de la transposition d'incertitudes, voire de la proposition d'améliorations ;
- de l'interprétation d'un événement ainsi que de la génération des procédures de conduite optimisées associées (diagnostic / pronostic / décision de conduite). Le diagnostic utilise un schéma hypothético-déductif et le pronostic – aide à la conduite – reproduit le modèle de génération de plans d'actions. Dans tous les cas, les alternatives (scénarios, réactions) sont animées par la simulation numérique qui intègre donc les deux premiers niveaux.

L'intégration de ces trois niveaux est indispensable pour relever les défis technologiques et garantir la sûreté des systèmes nucléaires actuels et futurs. Cette tâche a été lancée dans

les années 80. Les exigences de sûreté et d'optimisation de l'exploitation la remettent à l'ordre du jour. Des modèles et des outils innovants existent. Parmi eux ont déjà été cités : le langage de commande et la représentation orientée objet ; la génération de plans d'actions ; les modèles de raisonnement hypothético-déductifs animés par simulation ; les outils d'évaluation, de combinaison d'incertitudes, les outils d'optimisation multicritère ; les moteurs d'inférence des systèmes à bases de connaissances ; etc.

Une liste (non exhaustive) de plateformes logicielles développées ou utilisées par les acteurs de l'ANCRE ou en partenariat industriel, qui intègrent une partie de ces outils et visent, par intégration de fonctionnalités nouvelles, des objectifs d'un niveau supérieur à leur capacité actuelle, figure dans le Tableau-1 ci-après.

	Niveau	Origine	Caractéristiques / spécificités	Diffusion
SALOME	1	EDF-CEA	Langage de commande Python ; assez complet en niveau 1 du pré au post-traitement ; couplages ; plug and play.	Open source
URANIE	2 → Couplage avec SALOME (partie niveau 3 en optimisation n-critères)	CEA	Bibliothèque en C++/Root (origine CERN) ; Méthodologies / incertitudes (propagation, estimation). Outils d'optimisation disponibles.	Accords spécifiques
SUNSET	1 + 2	IRSN	Interface graphique de lancement de codes et études de propagation d'incertitudes ; études probabilistes et possibilistes (logique floue)	Accords spécifiques
PROMETHEE	1 + 2 (partie niveau 3 en recherche de singularités)	IRSN	Interface graphique générique de lancement de codes, études de sensibilité, optimisation, inversion, propagation d'incertitudes ; langage de commande R	Accords/Ventes spécifiques
OpenTURNS	2 → Couplage avec SALOME	EDF	Bibliothèque Open Source en C++ incluant des méthodologies d'incertitudes (propagation, estimation) ; utilisé pour des études de type probabiliste, éventuellement pour des démonstrations de sûreté. Langage de commande Python	Open source
SPIRAL Opérationnel dans les années 1990	3	CEA	Générateur de systèmes à bases de connaissances ; des modèles de génération de plans d'actions ont été développés sur base SPIRAL et utilisés dans les applications	Accords spécifiques

Tableau-1 : Exemples de plateformes génératrices utilisées en France par les acteurs du nucléaire

La poursuite, la fédération et le partage des efforts sont nécessaires afin d'éviter que les progrès de méthodes (cognitives, sémantiques, algorithmiques) soient privés d'outils de mise en œuvre dans les applications.

7.3 THÈMES CLÉS EN R&D SUR LE CALCUL INTENSIF DANS LE CADRE DE L'ANCRE

7.3.1 LE CONTEXTE ET LES OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Faute de pouvoir offrir une puissance de plusieurs teraflops sans avoir recours au parallélisme, les constructeurs reportent sur les utilisateurs les efforts en matière de logiciels aptes à tirer parti des performances de leurs machines conçues pour le « calcul intensif ».

C'est dans cette anticipation qu'il s'agit de se situer, sans rien perdre de la flexibilité logicielle chèrement acquise.

Par ailleurs, il faut garder présentes à l'esprit les contraintes spécifiques de mise en œuvre du domaine applicatif : contraintes techniques et contraintes liées aux besoins très divers (voire antagonistes) des différentes classes d'utilisateurs, travaillant respectivement dans un contexte académique, de R&D exploratoire, d'analyse de sûreté, de compétition industrielle.

Les modalités opérationnelles et les disponibilités en ressources de calcul dans ces domaines sont très diverses. Le calcul de conception et de sûreté peut nécessiter, pour un calcul unique, la totalité des ressources en calcul accessibles. C'est le cas des grands défis qui permettent d'accéder à une représentation de référence d'une situation, d'un événement, d'une expérience. Les calculs industriels courants respectent d'autres contraintes ou offrent d'autres modalités d'application du parallélisme massif. Par exemple, l'évaluation des incertitudes d'une simulation peut se réaliser par un protocole probabiliste dans lequel les différentes sources d'incertitudes sont représentées et combinées à travers une simulation Monte Carlo de plusieurs dizaines de milliers de cas, offrant une occasion de parallélisme naturel. Les calculs individuels peuvent être assez simples, le gain se trouvant dans **la combinaison intelligente des incertitudes irréductibles et non dans un raffinement ultime du calcul élémentaire.**

De telles raisons (diversité des ressources disponibles et des méthodes d'évaluation optimisée des incertitudes globales), conduisent à assumer une grande diversité des moyens mis en œuvre, depuis les machines de bureau jusqu'aux moyens de calcul intensif (**HPC**) avec des centaines de milliers de processeurs et une puissance pétaflopique puis à l'avenir exaflopique, en passant par les **GPU**³⁰ et les clusters de processeurs. La distribution optimale des outils, des méthodes et des moyens doit tenir compte de cette diversité et des combinaisons possibles (modèles + numérique + hardware par exemple).

7.3.2 LES PRINCIPALES THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES

- Modèles de programmations et langages pour les architectures multi-pétaflopiques ;
- Algorithmique numérique pour les machines multi-pétaflopiques : (algorithmes et noyaux numériques utilisés de manière courante dans le domaine de la simulation pour l'énergie) ;
- Maîtrise du passage à l'échelle en parallélisation (d'un facteur cent à un million de processeurs), dont l'adaptation des codes de calcul aux architectures multicœurs, ou aux processeurs couplés à des accélérateurs de calcul, en particulier pour les applications les plus exigeantes en ressource de calcul, telles que les simulations multi-physiques, multi-échelles ;
- Nouvelles approches de modélisation intégrant les techniques probabilistes, en calcul, en quantification des incertitudes. Un reclassement des méthodes à utiliser pour résoudre divers problèmes de modélisation – simulation apparaîtra au cours de cette recherche ;
- Traitement des grandes masses d'informations : un sujet traditionnel dont le calcul intensif exacerbe les effets, qui est abordé notamment dans le cadre différent du domaine des hautes énergies exploré au CERN. Les transversalités qui existent donc sur ce sujet entre le domaine des réacteurs et celui des hautes énergies sont identifiées ; leurs explorations seront poursuivies. Ce sujet rejoint en particulier le problème de la place des méthodes probabilistes et de leur dialogue avec les méthodes déterministes, les deux ayant à l'avenir vocation à travailler de façon symbiotique à l'intérieur de calculs complexes. Le thème est essentiel pour les

³⁰ GPU : Graphics Processing Units

applications nucléaires et un positionnement d'excellence des équipes dans ce domaine est nécessaire.

Le sujet renvoie à la fois à la physique mathématique, à la représentation des connaissances et au génie logiciel. **Des méta-modèles seront nécessaires afin de disposer de représentations unifiées et cohérentes au-dessus de diverses représentations algorithmiquement efficaces** (probabilistes / individuelles vs. déterministes moyennées ; eulériennes vs. lagrangiennes, découpage par pavés volumiques ou par rayons, etc.).

7.3.3 LES PRODUITS, LES DÉMONSTRATIONS, LES JALONS ET LES MOYENS

L'objectif opérationnel est de combiner le potentiel des plateformes génératrices et celui du calcul intensif, au profit des calculs étalons aussi bien que des calculs applicatifs courants. Les démonstrations se traduiront, assez naturellement, par le succès des Grands Défis. Il convient de préparer au plus tôt, en commençant avec une capacité pétaflopique, les applications décisives (cœur numérique, RNR-Na (ASTRID), thermohydraulique diphasique, matériaux – mécanique des structures) qui ne seront pleinement productives qu'à l'approche de l'exaflops. Il est donc nécessaire, tout au long de la période couverte par la feuille de route, de disposer d'un accès bien dimensionné aux diverses sources (puissance et diversité technique) représentative du calcul intensif moderne et de ses évolutions les plus prometteuses pour l'ensemble des classes d'applications visées.



Une application pilote (cf. § 9.22 Tableau-4) est fournie par une proposition d'action labellisée « ANCRE » et provenant du thème « incertitudes » du paragraphe 6. Il s'agit des méthodes d'utilisation des simulations (intégrant les avis d'expert) en support à la décision. L'objectif est de développer des stratégies de calcul de simulation parcimonieuses en ressources et optimisées en résolution de problème d'expert (identification des limites de sûreté, exploration des zones de risque maximum), à confronter à des avis d'expert en formalisant l'adoption des objectifs et des critères sous-jacents aux décisions proposées. On retrouve dans ce problème toutes les composantes dont la combinaison seule peut être gagnante : calcul intensif (puissance, ergonomie, intégration dans la résolution de problème) + plateformes logicielles intégratrices / génératrices (de protocoles de calcul, de raisonnements de diagnostic/pronostic, de plans d'actions) + outils mathématiques/algorithmiques : plans d'expériences numériques, surfaces de réponse, modèles inverses, optimisation globale.

8 ENSEIGNEMENT ET FORMATION

8.1 FORMATIONS EXISTANTES

8.1.1 FORMATIONS SPÉCIFIQUES EN INGENIÉRIE NUCLÉAIRE

Les principaux acteurs de la formation dans le domaine de l'ingénierie nucléaire sont actuellement : l'INSTN avec l'enseignement de «Génie Atomique», Grenoble INP avec des formations d'ingénieurs («Génie Energétique et Nucléaire» pour l'école PHELMA, et «Ingénierie de l'Energie Nucléaire» pour l'école ENSE3) et des masters («Energétique physique», «Matériaux pour le nucléaire»), l'ENSTA (spécialité ingénieur, master, mastère spécialisé), l'UPMC Paris 6 (master «Ingénierie pour le nucléaire»), l'école des Mines de Nantes, l'ENSI-Caen, ces deux dernières ayant mutualisé une partie de leur offre (spécialités ingénieur, master). Plus récemment, l'université Aix-Marseille propose un master "Energie nucléaire" depuis la rentrée 2012.

De nouvelles formations ont ainsi été créées et les formations existantes ont été étoffées. Des formations internationales, en anglais, ont été ouvertes ces dernières années, par exemple le master "Nuclear Energy", co-habilité par l'INSTN (et soutenu par EDF, le CEA et AREVA), l'université Paris-Sud 11, l'Ecole Centrale Paris, Supélec, ParisTech (principalement ENSTA, ENSCP, ENPC). Le master "Material Science for Nuclear Engineering" (MANUEN) propose en seconde année une spécialisation sur les matériaux de

structures ou sur le combustible nucléaire, en partenariat avec le CEA et EDF. Enfin le master «Sustainable Nuclear Energy, Applications and Management» est partiellement mutualisé entre l'EMN et l'ENSI-Caen depuis 2011. Le potentiel de diplômés par ces formations approche maintenant les 500 étudiants par an.

Le Comité des Formations pour l'Energie Nucléaire (CFEN) a été créé pour coordonner l'offre française, puis l'Institut International de l'Energie Nucléaire (I2EN) pour la faire connaître à l'étranger, pour être un portail d'accueil des étudiants étrangers en France. Par ailleurs, la plupart des formations sus-mentionnées s'inscrivent dans le réseau européen ENEN (European Nuclear Energy Network), qui accrédite des parcours de formation mixant des modules suivis dans les divers pays européens partenaires.

Ce panorama est complété par des formations nucléaires plus spécialisées sur une discipline : ainsi en chimie avec l'offre de l'ENSCP, de l'ENSCM et de l'université de Montpellier 2 sur le cycle et en radiochimie ; ou encore avec l'offre de l'UBP Clermont Ferrand sur la physique et technologie des rayonnements, de l'ENSI Bourges en maîtrise du risque et sûreté, de l'ENS des Mines de Saint Etienne en génie des installations nucléaires, de l'UJF sur la sûreté, les déchets et le démantèlement.

Enfin, dans le cadre de diverses spécialités, plusieurs établissements proposent des enseignements sur le nucléaire avec des volumes variant d'environ 50 à 150 heures : à titre d'exemple, l'Ecole Polytechnique dans le cadre de son Programme d'Approfondissement « Energies du XXIe siècle », l'Ecole Centrale Paris dans le cadre de son option Energie, l'Ecole des Céramiques Industrielles à Limoges avec le parcours «Matériaux nucléaires, ainsi que l'Unité d'enseignement de l'ENSAM Ingénierie pour l'industrie nucléaire» (150 heures, 11 ECTS).

Au total, ce sont plus de 35 formations diplômant 1000 à 1100 élèves qui sont maintenant proposées. L'offre internationale rencontre un succès croissant avec plus de 200 étudiants.

8.1.2 FORMATIONS SPÉCIFIQUES EN SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Comme évoqué dans le paragraphe 2.3 relatif aux initiatives d'excellence scientifique, les membres du réseau européen ETSON (European Technical Safety Organisations Network), qui regroupe les TSO partenaires, échangent notamment sur les orientations à prendre pour améliorer la sûreté nucléaire. Ces orientations se concrétisent pour ce qui concerne en particulier la formation par une initiative commune lancée par l'IRSN français, la GRS allemande, l'UJV tchèque et le LEI lituanien : la création de l'ENSTTI, institut européen de formation et de tutorat (<http://www.enstti.eu>). Les activités de cet Institut interviennent en aval des formations universitaires ou d'un premier parcours professionnel dans le secteur nucléaire. L'ENSTTI offre des formations courtes appliquées et des stages longs de tutorat pour enseigner les savoir-faire européens de recherche et d'expertise en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection. S'appuyant sur les compétences et les ressources des différents TSO membres, l'ENSTTI forme aux techniques, pratiques et méthodes propres à développer, en Europe et dans le monde, les savoir-faire d'évaluation et d'analyse des risques nucléaires et radiologiques. A travers la création de l'ENSTTI, il s'agit notamment de contribuer à répondre, en partenariat avec l'Union Européenne et l'AIEA, aux besoins d'expertise et de recherche en sûreté nucléaire liés aux programmes actuels et futurs de développement du nucléaire civil en Europe et dans le monde.

D'autres organisateurs de formations continues, généralistes ou plus centrées sur leurs métiers, en poursuivent le développement et l'adaptation aux évolutions des besoins : EDF, AREVA, l'INSTN, etc.

8.2 NOUVEAUX BESOINS / MOYENS DE FORMATION

8.2.1 NOUVEAUX BESOINS DE FORMATION LIES AUX PROPOSITIONS DE R&D EN PHYSIQUE DES RÉACTEURS

Aujourd'hui l'offre de formations en nucléaire est bien développée et ne nécessite pas d'être élargie. Il faut par contre veiller à ce que le programme des formations existantes suive les évolutions de la R&D en adaptant ou en intégrant certains enseignements. La question des incertitudes par exemple peut être réexaminée et donner lieu à des évolutions au sein des formations en nucléaire.

Il faut également s'assurer que l'offre dans le domaine de la sûreté et du risque répond bien à la demande ; elle devrait donc être réexaminée dans le contexte post Fukushima. Il faut aussi être vigilant sur le substrat nucléaire que ces formations apportent de façon à ce que la sûreté combine harmonieusement une puissante logique de maîtrise du risque et l'agilité dans le maniement de la physique et des sciences de base du nucléaire, cœur de la réalité des phénomènes étudiés.

En termes de **besoin de formation en physique des réacteurs**, compte tenu des attentes actuelles des entreprises du secteur pour les métiers de l'exploitation (conduite/ sûreté) et de l'ingénierie (études de conception/sûreté et démantèlement), il apparaît important de sensibiliser les élèves ingénieurs et de master en génie nucléaire au fait que la physique de fonctionnement est le plus souvent régie par le couplage neutronique / thermohydraulique. Pour ce faire, il convient de pouvoir leur faire étudier, si possible sous forme de projets, le comportement dynamique d'un réacteur de puissance, de type réacteur à eau sous pression, dans ses différents domaines d'exploitation :

- en régime sous-critique, en présence d'une source de neutrons, pour analyser l'amplification de la population neutronique au cours d'une approche sous-critique ou d'un rechargement ;
- en régime sur-critique, sous le seuil de puissance Doppler (de chauffage nucléaire), pour vérifier la conformité du comportement avec les équations de cinétique introduites de manière théorique auparavant ;
- en puissance, pour caractériser le couplage neutronique / thermohydraulique cœur (contre-réactions Doppler, modérateur), en insistant sur la différence de comportement cœur prioritaire / secondaire prioritaire. **Pour ce qui concerne les moyens**, l'usage d'un **simulateur « principes de base »** (du type SIREP, développé par la société Corys) est suffisant pour répondre à l'ensemble de ces objectifs mais est très coûteux à l'achat.

Il n'existe pas d'outil équivalent pour le fonctionnement accidentel : l'étude des transitoires accidentels rapides, susceptibles de conduire à la prompt-criticité (éjection de grappe, RTV, voire dilution par front d'eau claire), exige des modèles plus élaborés que l'on trouve dans des simulateurs d'études du type SIPACT (EDF) ou SOFIA (AREVA/IRSN).

Les réacteurs de recherche sont utilisés, depuis les origines de l'énergie nucléaire, pour l'enseignement et la formation professionnelle. Ils assurent une approche concrète des phénomènes pratiques de la physique des réacteurs et font partie intégrante des programmes pédagogiques des établissements d'enseignement initial, ainsi que de la formation des exploitants nucléaires et des autorités de sûreté. Pour réaliser ces formations, les réacteurs utilisés sont, soit un réacteur principalement dédié à la formation (réacteur ISIS au CEA Saclay, avec un rôle de formation sur réacteur étendu au niveau européen : Suède, Finlande), soit des réacteurs ayant des programmes expérimentaux propres et réalisant des périodes de formation (tels que les réacteurs MINERVE ou AZUR à Cadarache). Les progrès réalisés sur les simulateurs de réacteur peuvent sembler réduire la nécessité des travaux pratiques sur réacteur de recherche, qui ont pourtant une valeur pédagogique irremplaçable. Assurer la pérennité de ces outils précieux est indispensable pour conserver cette plus-value unique en Europe du système de formation français des acteurs de l'électronucléaire.

8.2.2 AUTRES BESOINS

Un renforcement des liens et collaborations industrie / monde universitaire tant en recherche qu'en enseignement, visant à se rapprocher de ce qui existe dans les pays anglo-saxons par exemple, serait particulièrement intéressant dans le domaine du nucléaire où les industriels concernés, en se limitant aux donneurs d'ordre, sont très bien ciblés et possèdent la capacité d'intégrer ce type de partenariat.

En ce qui concerne les connexions entre l'industrie et le monde universitaire en enseignement, les industriels sont déjà impliqués dans les conseils d'administration et de perfectionnement, ainsi qu'à travers la participation d'experts industriels aux enseignements et à l'encadrement de stages. L'expression de leurs besoins tient compte de divers aspects. En particulier, le cœur de compétences proprement nucléaires est minoritaire dans leurs métiers. D'autre part, ils recrutent des profils généralistes dont ils assurent largement le complément de formation en interne.

Des liens forts sont à mettre en place via des stages co-encadrés. Il convient de poursuivre et d'intensifier l'effort dans cette voie, par exemple à travers un renforcement de l'enseignement par projets avec implication des industriels, cette approche par projets étant d'ailleurs encouragée par les instances nationales d'orientation des enseignements.

9 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

9.1 ÉLÉMENTS DE SYNTHÈSE

La feuille de route considère la physique des réacteurs conformément à la vision qui en a assuré le succès et l'efficacité : le progrès permanent de la capacité prédictive de simulations numériques validées, ainsi que de la capacité de quantifier et de borner les incertitudes, de les transposer depuis les expériences jusqu'aux calculs opérationnels de dimensionnement, de sûreté, d'exploitation normale ou accidentelle.

La feuille de route est structurée par les contraintes et les objectifs suivants :

- la nécessité de relever à temps les grands défis liés à la sûreté, à la compétitivité, à la durabilité (ressources, déchets), pour le parc électronucléaire actuel, pour les réacteurs de Génération-3, ainsi que pour ceux de la Génération-4. Ces défis jalonnent la période étudiée (2015 / 2025) avec des étapes à trois, cinq et dix ans ;
- la nécessité de capitaliser, au sein d'une simulation multi-physique et multi-échelle, le progrès des connaissances théoriques et expérimentales, depuis la recherche de base jusqu'au retour d'expérience industriel. C'est aujourd'hui, à une époque de rationalisation et de réduction des parcs expérimentaux, en particulier des installations visant à une représentativité directe, une option incontournable et porteuse d'une valeur scientifique et industrielle élevée. C'est dans cette vision que se développent les partenariats stratégiques autour du « **cœur numérique** » des réacteurs de fission de toutes générations ;
- la volonté d'inscrire la recherche et développement dans un cadre européen et de proposer des projets s'inscrivant dans les programmes de NUGENIA, d'ESNII et de NC2I, afin de préparer les décisions programmatiques d'HORIZON 2020³¹. La volonté de fournir à l'ANR, dans le cadre national, une vision des orientations prioritaires de la R&D permettant de valider la pertinence de projets qui lui seront proposés en physique des réacteurs dans les années à venir.

La feuille de route a permis d'identifier une quinzaine de projets marqués du logo de l'ANCRE dans les divers paragraphes thématiques et résumés dans le tableau ci-dessous. Ces projets sont à même de fédérer les efforts de plusieurs acteurs de l'Alliance. Ils sont en

³¹ L'ANCRE a participé dès 2011 à la proposition d'orientations de recherche pour l'initiative NUGENIA

continuité avec les travaux en cours, ils permettent de développer de nouvelles synergies et d'accélérer l'atteinte des objectifs prioritaires en physique, en conception – design, en simulation numérique.

La prochaine étape consiste à opérer une sélection d'une demi-douzaine de projets jugés mûrs et prioritaires et de développer des propositions qui seront présentées aux agences dans le cadre français et dans le cadre européen.

9.2 PROPOSITIONS D' ACTIONS COORDONNÉES POUR GROUPEMENTS ET AGENCES DE RECHERCHE

Tableau-2 - NEUTRONIQUE (cf. § 3)

Titre	Domaine	Progrès	Partenaires	Outils concernés
Le calcul Monte Carlo évoluant	Calcul : Boltzmann & Bateman	Convergence numérique, réduction de variance, benchmarking	CNRS, Universités, Grandes Ecoles, IRSN, CEA	Logiciels TRIPOLI, MURE et REM, VESTA
Calculs étalons	Calcul : Synergie Monte Carlo - déterministe	Représentation(s) des données nucléaires ; Convergence accélérée vers calcul prédictif par couplage déterministe – Monte Carlo. Utilisation en résolution de problème inverse (ex. : interprétation d'expérience critique ou sous-critique afin d'améliorer les données nucléaires)	CNRS, Universités, Grandes Ecoles, IRSN, CEA	TRIPOLI MORET MCNP APOLLO, CRONOS, etc.
Données nucléaires : utilisation optimisée et fédérée des accélérateurs	Données nucléaires	A partir des installations existantes, assurer la meilleure utilisation collective des accélérateurs ainsi que la pérennité des fonctions logistiques (cibles)	CNRS, Universités, Grandes Ecoles, CEA, IRSN	GELINA, n-TOF, GANIL
Données nucléaires : relais de PACEN-GEDEPEON au sein de NEEDS-PF-SN	Données nucléaires	Assurer le transfert des actions et la réévaluation des priorités, depuis PACEN-GEDEPEON jusqu'à NEEDS- PF SN, en valorisant les sources de connaissances de nature théorique (physique nucléaire), expérimentales (accélérateurs, expériences critiques et sous-critiques, retour d'expérience accessible).	CNRS, Universités, Grandes Ecoles, CEA, IRSN	Accélérateurs, expériences critiques ou sous-critiques
Données nucléaires : des PKA aux dommages : la voie du calcul et la validation (accélérateurs)	Données nucléaires et calculs neutroniques & atomiques	Construire un chemin de modélisation et de validation depuis les calculs de flux, les calculs de PKA ³² , la naissance et l'évolution des dommages (DART → MATIX). La validation expérimentale doit être orientée vers la réduction des hypothèses arbitraires	CEA, ECP, CNRS, Universités,	Accélérateurs, plateformes (JANNUS), mesures et visualisation (ANR)

³² PKA : Primary Knock-on Atom

Tableau-3 - THERMOHYDRAULIQUE (cf. § 4)

Titre	Domaine	Progrès	Partenaires	Outils concernés
Programme expérimental de validation des modèles pour les calculs de conception et d'analyse de sûreté	Thermohydraulique expérimentale : définir les installations, l'instrumentation et les plans d'expériences nécessaires pour le progrès de modèles intégrables dans les logiciels de simulation, pour une « enveloppe de vol » phénoménologique à préciser	Enrichissement et optimisation du potentiel dont disposent les acteurs français du nucléaire pour améliorer significativement les modélisations mono et diphasiques pour la conception et l'analyse de sûreté. Maintenir une relation étroite avec les mathématiciens et numériciens. Le cahier des charges provient des besoins pour une nouvelle génération de codes « composant »	Partenariat quadripartite (CEA, IRSN, EDF, AREVA) CNRS, Universités et Grandes Ecoles	Boucles expérimentales Instrumentation innovante "Physique mathématique"
Recherche amont sur la modélisation physique de la crise d'ébullition	Thermohydraulique diphasique : mécanismes physiques et modélisation multi-niveau	Acquisition de données expérimentales, développement et validation de modèles physiques, simulation numérique	CEA, IRSN, CNRS, Universités et Grandes Ecoles. Coopération européenne et internationale (USA...)	Boucles expérimentales Instrumentation Physique mathématique (LRC MANON)
Mécanique des fluides (hélium ; magnétohydro-dynamique, crise d'ébullition pour la fusion)	Thermohydraulique pour la fusion : refroidissement propre à première paroi, aux couvertures, etc.	Problèmes communs à la fission et à la fusion : flux critique, hélium à haute température en canaux, tuyauteries, échangeurs... D'autres (fluide fertile sous champ...) sont spécifiques	CNRS, Universités, Grandes Ecoles, CEA	Boucles expérimentales ; instrumentation
Recherche amont transverse en mathématiques appliquées	Nouvelle génération d'outils de simulation entrant dans des couplages multi-physiques : mieux spécifier les besoins pour le « cœur numérique », les réacteurs à eau, les générateurs de vapeur...	Code « composant » de nouvelle génération avec une modélisation au « juste niveau » assurant la qualité de la chaîne complète : écoulements diphasiques multichamps ; modèles, validation ; quantification et transposition des incertitudes ; calculabilité et intégration cohérente dans la simulation globale n-physique (couplage avec la mécanique des structures (IFS), neutronique, déformabilité des structures et des canaux, etc.	Partenariat quadripartite (CEA, IRSN, EDF, AREVA) ; CNRS, Universités et Grandes Ecoles	Mathématiques appliquées (LRC MANON et al.)
Calculs étalons et « calcul intensif »	Calculs étalons en simulation numérique directe	DNS turbulente monophasique à « haut » Reynolds au voisinage d'une paroi ; DNS diphasique en conditions simplifiées (cellules de Hele-Shaw ...) bien spécifiées	CEA, CNRS, Universités et Grandes Ecoles	Expériences spécifiques très bien instrumentées & Calcul intensif
Etudes d'écoulements polyphasiques en sels fondus	Thermohydraulique en sels fondus pour le concept de réacteur à sels fondus	Thermohydraulique en sels fondus expérimentée dans une boucle (FFER) avec une instrumentation avancée	CNRS, Universités et Grandes Ecoles	FFER Instrumentation innovante

Tableau-4 - INCERTITUDES (cf. § 6)

Titre	Domaine	Progrès	Partenaires	Outils concernés
<p>Accident RTV sur REP : couplage thermo-hydraulique 3D / neutronique 3D / code système / simulation combustible (Voir la description dans le tableau « couplages »)</p>	<p>Evaluation de sûreté : RTV sur REP avec perte des Groupes Motopompes Primaires (GMPP)</p>	<p>La profondeur (amplitude, non-linéarité) et la complexité des couplages posent un défi à la quantification des incertitudes</p>	<p>IRSN, CEA</p>	<p>Modèles, algorithmes et plateformes pour l'évaluation des incertitudes</p>
<p>Transitoires accidentels non protégés sur RNR-Na (dont ULOF). (Voir la description dans le tableau « couplages ») Autres transitoires sur filières Gen-4</p>	<p>Evaluation de sûreté : ULOF (<i>Unprotected Loss of Flow</i>) avec permanence de la convection naturelle</p>	<p>La profondeur (amplitude, non-linéarité) et la complexité des couplages posent un défi à la quantification des incertitudes</p>	<p>CEA, CNRS, Universités et Grandes Ecoles, IRSN</p>	<p>Modèles, algorithmes et plateformes pour l'évaluation des incertitudes</p>
<p>Méthodes d'évaluation et de fusion d'information</p>	<p>Combiner de façon optimale (précision – prudence) des informations de nature différente (intégration d'avis d'expert, de simulations...)</p>	<p>Transposition des concepts de justesse et de fidélité utilisés en métrologie (pour évaluer la qualité d'une mesure) à l'évaluation d'informations plus complexes comme un avis d'expert ou un résultat de simulation</p>	<p>IRSN, IRIT (Toulouse), etc.</p>	
<p>Méthodes d'utilisation des simulations en support à la décision. (Voir le tableau suivant : du calcul vers la résolution de problème)</p>	<p>En support à l'analyse de risque, intégrer les incertitudes liées aux modèles utilisés dans les résultats des simulations et formaliser l'adoption des objectifs et des critères sous-jacents aux décisions proposées</p>	<p>Développer une méthodologie robuste de propagation des incertitudes « source » afin de faciliter et de « durcir » la précision associée aux résultats des simulations. Un formalisme unifié (de type bayésien) associant (en mode pronostic ou diagnostic) probabilités de valeurs d'entrée et de sortie est nécessaire. Développer des stratégies de calcul de simulation (parcimonieuses, optimisées) en résolution de problème d'expert (identification des limites de sûreté, etc.). Enjeu conjoint de calcul intensif (puissance, ergonomie, intégration dans la résolution de problème)</p>	<p>IRSN, CEA, CNRS, Universités et Grandes Ecoles</p>	<p>Calcul intensif, plateformes logicielles intégratrices / génératrices ; outils mathématiques : plans d'expériences numériques, surfaces de réponse, modèles inverses, optimisation globale</p>

TABLEAU-5 - PLATEFORMES LOGICIELLES : INTEGRATION DE LA SUPERVISION ET DU CALCUL INTENSIF : DU CALCUL VERS LA RESOLUTION DE PROBLEME (cf. § 7)

Titre	Domaine	Progrès	Partenaires	Outils concernés
<p>Méthodes d'utilisation des simulations en support à la décision. <i>(Voir le tableau précédent : incertitudes)</i></p>	<p>En support à l'analyse de risque, intégrer les incertitudes liées aux modèles utilisés dans les résultats des simulations, et formaliser l'adoption des objectifs et des critères sous-jacents aux décisions proposées</p>	<p>Développer des stratégies de calcul de simulation (optimisées, parcimonieuses) en résolution de problème d'expert (identification des limites de sûreté, etc.). Enjeu conjoint de calcul intensif (puissance, ergonomie, intégration dans la résolution de problème)</p>	<p>IRSN, CEA, CNRS, Universités et Grandes Ecoles</p>	<p>Calcul intensif, plateformes logicielles intégratrices / génératrices ; outils mathématiques : plans d'expériences numériques, surfaces de réponse, modèles inverses, optimisation globale</p>