

NEEDS : Nucléaire : Energie, Environnement, Déchets, Société
PROJETS STRUCTURANTS 2023
Date limite de dépôt 26 Octobre 2022

Ce document est à renvoyer à votre contact du COPIL NEEDS, copie à needs@in2p3.fr et à Sylvain David sylvain.david@ijclab.in2p3.fr

Le programme NEEDS, porté par le CNRS et les partenaires Andra, BRGM, CEA, EDF, Framatome, IRSN et Orano, vise à mobiliser une recherche académique sur les grandes questions liées au nucléaire de fission. Les thématiques générales du programme sont :

- Réacteurs nucléaires et transition énergétique : modélisation neutronique, thermohydraulique, combustible ; couplages multi-physiques ; modélisation du cycle du combustible ; matériaux sous irradiation ; radiochimie pour le cycle du combustible ; modélisation économique ; place du nucléaire dans le mix électrique et études de scénarios associées.
- Déchets nucléaires : caractérisation ; matériaux pour le stockage des déchets ; comportement des radionucléides dans un site de stockage ; géologie associée ; milieux poreux ; couplages multi-échelles.
- Environnement : comportement des radionucléides dans l'environnement ; mécanisme de transfert des radionucléides ; effets écotoxiques ; marqueurs biologiques et indicateurs environnementaux ; interaction avec le biotope ; territoires nucléaires en évolution.
- Ressources : traçage et traçabilité de l'uranium ; des éléments associés et des fluides minéralisateurs ; modèles et modélisation des gisements d'uranium et de leur impact environnemental ; processus, procédés et mécanismes des réactions aux interfaces liquide/solide, liquide/liquide.

Le programme NEEDS favorisera en priorité des projets de recherche de science fondamentale dédiés à une meilleure compréhension ou modélisation des mécanismes mis en jeu dans les objets du nucléaire, ainsi que l'acquisition de données de base d'intérêt pour les thématiques du programme.

Certains sujets ont été identifiés par l'ensemble des partenaires comme particulièrement stratégiques et nécessitant la mobilisation de plusieurs équipes, issues de différents partenaires. Il a donc été décidé de confier le montage de projets structurants à un ou plusieurs porteurs. Ces projets structurants seront évalués par le Comité Scientifique du programme. Ces projets sont financés annuellement, mais le projet déposé doit décrire le programme de travail et le budget demandé sur 2 ou 3 ans.

NEEDS pourra financer quelques bourses de thèse, uniquement sur des projets structurants. Il est cependant important que la réalisation du projet ne soit pas assujéti à l'obtention de cette bourse de thèse par NEEDS. La demande de bourse de thèse se fait dans le texte de description en détaillant le sujet de thèse sur une page maximum. La demande en ressources humaines à renseigner dans les tableaux en fin de document concerne uniquement les demandes de CDD post-docs ou de stages.

Notes

Cet appel à projets s'inscrit dans le cadre du programme pluri-partenaires NEEDS. À ce titre, lors de la soumission de la proposition, le porteur s'engage à recueillir l'accord de son directeur d'unité sur cette initiative et de demander aux équipes participantes de tenir informées leurs directions respectives. Le projet devra respecter la convention NEEDS, en cours de signature entre les partenaires du programme.

Conditions de financement :

- *Les financements accordés seront versés en début d'année 2020, sous réserve de la signature de la convention générale du programme par l'ensemble des partenaires.*
- *Les crédits alloués en subvention d'État (SE) devront être utilisés pendant l'année de leur notification. Aucune dérogation ne pourra être accordée. Certains crédits pourront être alloués en Ressources Propres (RP). Compte tenu des budgets envisagés, les dépenses en personnels devront principalement concerner des stages, et ne pourront être prises que sur les ressources propres.*
- *Les projets pourront être portés par une équipe des organismes partenaires de NEEDS. Les équipes de recherche relevant d'autres organismes que les parties et affiliés peuvent être associées à des propositions. En cas d'acceptation de ces propositions, elles doivent respecter les conditions contractuelles prévues dans la Convention générale de NEEDS.*

Les équipes participantes aux projets retenus dans le cadre de cet AAP doivent :

- *Respecter le cadre fixé par la convention générale de NEEDS, en cours de signature par les partenaires.*
- *Sous la responsabilité du porteur du projet, contribuer à la production des rapports scientifique et financier. Ces documents feront l'objet d'une évaluation par les instances de NEEDS.*
- *Participer aux réunions de restitution organisées annuellement qui visent à accroître les échanges entre les communautés scientifiques et à valoriser l'ensemble des travaux menés dans le cadre de NEEDS.*
- *S'engager à privilégier la publication des travaux dans des revues internationales à comité de lecture et à faire référence, dans toutes ces publications, au soutien accordé par NEEDS, en indiquant explicitement «The authors acknowledge the French programme NEEDS for its financial support to the project » .*

NEEDS : Nucléaire : Energie, Environnement, Déchets, Société
PROJETS STRUCTURANTS 2023
Date limite de dépôt 26 Octobre 2022

Ce document est à renvoyer à votre contact du COPIL NEEDS, copie à needs@in2p3.fr et à Sylvain David sylvain.david@ijclab.in2p3.fr

Identification projet et du porteur

Nom du porteur du projet	Nicolas Thiollière
Nom du co-porteur (si nécessaire)	Fanny Courtin
Titre long	Contributions Interdisciplinaires sur le Nucléaire et l'Énergie : Analyse de Scénarios pour la Transition Énergétique
Acronyme	CINEASTE
Durée de projet (2 ou 3 ans)	3 ans

Résumé du projet : (15 lignes max)

Les processus de décision à la base de l'évolution des mix énergétique et électrique induits par la transition énergétique sont particulièrement complexes. Parmi les outils à disposition des acteurs pour réaliser des études de prospective, les scénarios énergétiques, électriques et/ou nucléaires sont particulièrement répandus. L'évolution du parc de production électrique est un paramètre clé de la transition énergétique. Tout d'abord, la réduction des émissions de G.E.S. passe par l'électrification massive des usages. Ensuite, la montée en puissance des énergies renouvelables non pilotables implique d'étendre les capacités de flexibilité, par exemple le suivi de charge des réacteurs nucléaires. Les scénarios électriques apportent des éclairages importants dans la mesure où ils embarquent des problématiques technico-économiques multiples, en lien étroit avec le parc électronucléaire. Le projet CINEASTE a pour principal objectif de qualifier et quantifier la résilience d'un parc électrique face à une disruption (ou perturbation) de la disponibilité nucléaire. Un schéma de calcul spécifique mettant en œuvre plusieurs outils de modélisation (réacteurs, cycle nucléaire et marchés de l'électricité) sera construit sur l'année 2019. Ce schéma de calcul sera ensuite perturbé en postulant l'indisponibilité fortuite de certaines unités de production nucléaires. Nous proposons dans ce cadre de qualifier plus précisément, via la méthodologie des focus-groups, la nature des disruptions considérées ou à considérer dans le travail de scénarisation.

Pour les nouveaux projets structurants (pour les projets en cours, rappeler les laboratoires et un représentant par équipe)

Identification des équipes impliquées (y compris celle du porteur):

Pour chacune des équipes, indiquer savoir-faire et responsabilité dans le projet. Nom et prénom des personnes impliquées, ainsi que le temps consacré au projet (personne.mois)

Tutelles de chaque laboratoire (unité de recherche) et Institut CNRS de rattachement le cas échéant.

Equipe 1 : CEA / DES / IRESNE / DER		
Nom	Responsabilités/compétences	Personne.mois/an consacrés au projet
Fanny Courtin	Ingénieur-Chercheur physique des réacteurs et du cycle	3
Sarah Eveillard	Doctorante	3
Aimeric Eustache	Ingénieur-Chercheur physique des réacteurs et du cycle	0.5
Kévin Tirel	Ingénieur-Chercheur physique des réacteurs et du cycle	0.5
Jean-Baptiste Drouin	Ingénieur-Chercheur physique des réacteurs et du cycle	0.5
Equipe 2 : CEA / ITésé		
Nom	Responsabilités/compétences	Personne.mois/an consacrés au projet
Sophie Gabriel	Économiste de l'énergie	0.5
Equipe 3 : CEA / SERMA		
Nom	Responsabilités/compétences	Personne.mois/an consacrés au projet
Jean-Michel Do	Ingénieur-Chercheur. Physique des réacteurs	0.5
Equipe 4 : CNRS/IN2P3 – IJC Lab		
Nom	Responsabilités/compétences	Personne.mois/an consacrés au projet
Xavier Doligez	Chargé de Recherche. Physique des réacteurs et du cycle	10
Marc Ernoult	Chargé de Recherche. Physique des réacteurs et du cycle	9
Equipe 5 : CNRS/IN2P3 – IMT Atlantique - Subatech		
Nom	Responsabilités/compétences	Personne.mois/an consacrés au projet
Nicolas Thiollière	Enseignant-Chercheur. Physique des réacteurs et du cycle, technico-économie	6
Equipe 6 : Nantes Univ. IAE		
Nom	Responsabilités/compétences	Personne.mois/an consacrés au projet
Lionel Lemiale	Enseignant-chercheur. Économie de l'énergie et de l'environnement	1.5
Equipe 7 : IMT Atlantique - LEMNA		
Nom	Responsabilités/compétences	Personne.mois/an consacrés au projet
Stéphanie Tillement	Enseignante-Chercheuse. Sociologie industrielle, sociologie des organisations et du travail	1.5

Rajouter autant de tableaux que d'équipes impliquées dans le projet. Pour les laboratoires CNRS, merci d'indiquer l'Institut tutelle.

Mots clés : Scénarios, Mix électrique, Parc nucléaire, Flexibilité, Résilience, Robustesse, Transition énergétique

Bilan de projet CINEATE pour la période 2020 - 2022

Cette section décrit le bilan du projet CINEASTE pour la période 2020 – 2022. La nouvelle orientation du projet pour l'année 2023 et la demande de soutien financier associée est rédigée dans la partie suivante.

1. CONTEXTE DU PROJET

1.1. La transition énergétique

De nombreux pays dans le monde sont officiellement engagés dans une démarche de transition énergétique. Les constats scientifiques [1] à la base de ce mouvement sont sans ambiguïté. Les risques liés au changement climatique induit par les émissions de gaz à effet de serre nécessitent une remise en cause profonde de la structure de la production énergétique au niveau mondial, actuellement dominée par les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon). Si la mobilisation politique internationale est particulièrement active [2], les mises en application concrètes à l'échelle de chaque pays sont plus difficiles à percevoir.

Les processus de décision à la base de l'évolution de la structure de la production et de la consommation d'énergie sont particulièrement complexes. En tant que problématique d'intérêt sociétal, ils mobilisent de nombreux acteurs : les femmes et hommes politiques, les professionnel.le.s de l'énergie, les organismes de contrôle et de régulation, les expert.e.s scientifiques (chercheur.e.s de droit public ou privé), les associations, la population, etc. Ainsi, les déterminants de la transition énergétique sont multiples et s'appuient sur de nombreux critères, qu'ils soient de nature socio-économique, politique, scientifique, etc. En pratique, les déclinaisons concrètes des grands objectifs sont décidées et mises en application à l'échelle nationale. Cela conduit à des stratégies très hétérogènes selon les pays qui peuvent s'analyser à travers le cadre du concept de dépendance au sentier [3] ou encore à travers celui du « schéma type » [4] considéré.

Au niveau français, la stratégie de transition énergétique se concrétise à travers la loi de Transition Énergétique relative à la Croissance Verte (TEPCV) de 2015 [5] qui définit deux outils de pilotage de la politique énergétique révisés périodiquement. Le premier, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), constitue le pilier climatique de la politique énergétique de la France et vise à définir « la marche à suivre pour conduire la politique d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre dans des conditions soutenables sur le plan économique à moyen et long termes ». Un objectif de neutralité carbone en 2050 a été fixé par le gouvernement lors de la présentation du plan climat du 6 juillet 2017. La révision de la SNBC en 2020 entérine cet objectif et vise à en décliner les différentes étapes [6]. Le second, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie [7], constitue le pilier énergétique de l'action politique et vise à établir « les priorités d'action des pouvoirs publics pour la gestion de l'ensemble des formes d'énergie sur le territoire métropolitain continental ».

Sur la question spécifique de la production d'origine nucléaire en France, un débat public [8] a été organisé entre le 17 avril et le 25 septembre 2019 dans le cadre de la 5e édition du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) [9]. Le renouvellement du parc REP actuel par des réacteurs de génération III, EPR2, est également étudié par le gouvernement [10], sur demande de la Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028.

1.2. L'apport des études prospectives

En pratique, une décision d'investissement rationnelle implique une certaine forme d'anticipation de ce que sera le futur. Le domaine de l'énergie est particulier dans la mesure où les investissements sont relativement conséquents et que les technologies déployées engagent généralement sur le long-terme [11], de quelques dizaines d'années pour le solaire ou l'éolien, jusqu'à la centaine d'années voire plus pour l'énergie nucléaire.

Parmi les outils à disposition des acteurs pour réaliser des études de prospective, les scénarios énergétiques sont particulièrement répandus. Les études de scénarios ont de nombreux intérêts au-delà de leur rôle supposé d'outil d'aide à la décision. Tout d'abord, les scénarios permettent de mieux appréhender et donc mieux comprendre les systèmes énergétiques. Ils permettent également d'analyser ces systèmes sous l'angle technique et/ou socio-économique. Ils mobilisent en conséquence de nombreuses communautés de pratique et sont par essence interdisciplinaires. Les scénarios constituent des objets frontières [12] au sens où ils rendent possible la coordination d'acteurs issus de mondes sociaux différents et pouvant être amenés à coopérer.

Les études de scénarios peuvent être distinguées par leur cadre d'analyse. L'échelle spatiale du scénario constitue la première distinction caractéristique. Les échelles mondiale, régionale, nationale et territoriale peuvent être ainsi considérées. L'horizon temporel constitue une deuxième dimension caractéristique. Usuellement, le scénario débute à l'instant présent pour se terminer quelques dizaines, voire quelques centaines d'années après l'instant initial. Le cadre systémique constitue une troisième dimension du scénario. Il permet de définir le système à considérer dans le cadre de l'étude. Cela peut être le système énergétique global, c'est-à-dire le triplet source/vecteur/usage. Cela peut-être également le système de production d'électricité (sous-système du système énergétique) ou encore le système de production nucléaire. Les cadres spatial, temporel et systémique permettent en conséquence de dissocier ce qui est du domaine de l'exogène (c'est-à-dire qui est en dehors du cadre du modèle) et ce qui doit être traité par le modèle. Une fois le cadre d'analyse parfaitement défini, le scénario utilise un modèle éventuellement basé sur un outil de simulation. Le modèle nécessite de définir en amont l'ensemble des paramètres nécessaires à son fonctionnement. Ces paramètres peuvent être fixes ou variables, contrôlés ou non. Le modèle fournit alors des données de sorties qui sont traitées et analysées de manière à fournir des éléments quantitatifs (coûts de production, besoin en ressources, besoin en flexibilité...) en lien avec la problématique formulée.

1.3. Diversité des incertitudes

Comme toute étude basée sur la modélisation d'un système, les scénarios embarquent des sources d'incertitudes diverses dont certaines dépassent les incertitudes communément considérées dans les modélisations physiques. Une partie de ces incertitudes apparaît comme usuelle (données historiques décrivant le système à l'état initial, biais de modélisation, données mesurées, etc.), au sens où elles sont habituellement traitées par le modélisateur et disposent de méthodologies dédiées (propagation, théorie des perturbations, etc.). Cependant, les simulations de scénarios embarquent également des incertitudes profondes (deep uncertainty). Ce concept fait référence à un haut niveau d'incertitude concernant le futur, expliqué par l'existence d'une multitude de futurs énergétiques plausibles, qu'il n'est pas possible de classer en fonction de leurs probabilités respectives. Le producteur de scénarios doit alors intégrer ce contexte d'incertitude à ses pratiques de scénarisation.

Depuis plusieurs années, les équipes de recherche impliquées dans le projet CINEASTE produisent de nombreuses études de scénarios nucléaires [13] [14]. Les développements récents des outils de simulation ont permis de construire de nouvelles méthodologies pour l'étude et l'analyse des scénarios nucléaires, basées sur des méthodes de propagation d'incertitudes [15], ou encore sur l'analyse globale de sensibilité [16]. Sur la base de cette expérience, le projet CINEASTE vise à produire de la connaissance sur les scénarios énergétiques avec un focus particulièrement fort sur les scénarios électronucléaires.

2. PROBLÉMATIQUES ET AXES DE RECHERCHE

Le projet CINEASTE vise à mieux définir le rôle des scénarios dans les décisions politiques et industrielles relatives à l'énergie et au nucléaire du futur. Les retombées pratiques permettent d'améliorer les méthodologies de construction des scénarios, mais aussi de mieux comprendre et analyser les scénarios existants. Le deuxième objectif du projet est centré sur la prise en compte des conflits de temporalité relatifs à l'énergie et le nucléaire du futur dans un contexte d'incertitude profonde. En pratique, le cadre théorique issu de la sociologie (concept de résilience et robustesse) est utilisé pour analyser les scénarios nucléaires. Les résultats qui en découlent pourront être étendus aux études de scénarios énergétiques. En parallèle, les scénarios énergétiques sont interprétés à la lumière du couplage entre les modélisations économique et physique.

Le projet CINEASTE s'articule autour de deux problématiques et 3 axes de recherche rappelés ci-dessous :

I - Problématiques et axes historiques du projet : Caractérisation des scénarios

Problématique #1 : "Quel est le rôle des scénarios dans les décisions politiques et industrielles (notamment par rapport aux choix d'investissements) relatives à l'énergie du futur ?"

Problématique #2 : "Comment prendre en compte l'incompatibilité entre la temporalité caractéristique de la prospective énergie/nucléaire et la temporalité de la décision (temporalité politique) dans un contexte d'incertitude profond (deep uncertainty) ?"

Axe #3 : Analyse des incertitudes et propagation dans les scénarios nucléaires

II - Thématiques d'ouverture : Études de scénarios énergétiques

Axe #4 : Développement d'un modèle technico-économique d'analyse d'une transition énergétique

Axe #5 : Étude de scénarios énergétiques, analyse de mix

3. BILAN SCIENTIFIQUE

3.1. Modélisation des scénarios nucléaires

Point de départ des collaborations antérieures ayant abouties au projet CINEASTE, les études de scénarios nucléaires visent à quantifier l'impact d'un changement de stratégie considéré, sur les observables du cycle. Elles s'appuient sur des simulations du cycle du combustible nucléaire, réalisées par un code de scénario, modélisant toutes les opérations réalisées sur le combustible nucléaire de la mine au stockage définitif. L'amélioration continue de la représentativité des outils est une problématique centrale afin de préciser les modélisations de parcs nucléaires. Celle-ci passe par la gestion des incertitudes « usuelles ». Ces incertitudes sont habituellement rassemblées en trois catégories : les incertitudes des données nucléaires utilisées dans la modélisation neutronique, les biais de modélisation et les données permettant de décrire le parc nucléaire historique, état initial de la modélisation.

Le premier point a fait l'objet de la thèse de Guillaume Krivtchik [19] réalisée au CEA et soutenue en 2014, antérieure au projet CINEASTE. Dans ces travaux, les incertitudes liées aux données nucléaires sont propagées dans la simulation de parc nucléaire, conduisant à une incertitude sur les inventaires en matière des actinides de quelques pourcents.

La quantification des incertitudes liées aux biais de modélisation physique dans les scénarios nucléaires est traitée dans CINEASTE et a été abordée dans le cadre des maîtrises de recherche de Martin Guillet [20] et de Maxime Paradis [21] à Polytechnique Montréal en collaboration avec l'IJCLab. Ces travaux portent sur la modélisation des réacteurs par des calculs neutroniques à l'échelle du cœur (fabrication du combustible et irradiation) dans les codes de scénarios, et notamment les réacteurs hétérogènes 30% MOX. La démarche se base sur un schéma de calcul cœur à deux étapes réalisées avec les codes DRAGON/DONJON afin de suivre

l'évolution de la réactivité en fonction du temps d'irradiation. Du point de vue de la fabrication du combustible, l'objectif est d'identifier la teneur en plutonium dans les assemblages MOX neufs en fonction de l'isotopie du plutonium disponible ainsi que l'enrichissement en U-235 dans les assemblages UOX afin de garantir l'irradiation. Usuellement dans les calculs de cycle, ces grandeurs sont estimées grâce à des modèles MOX ou UOX basés sur des calculs à l'échelle de l'assemblage. Dans ces travaux, l'étude des facteurs de forme de puissance pendant l'évolution en fonction de la teneur et de l'enrichissement permet de construire une relation entre ces deux grandeurs qui garantit un facteur de forme minimal. Le calcul DONJON du cœur complet permet de calculer précisément les inventaires de sortie des assemblages MOX et UOX et de les comparer à des calculs utilisant des modèles moins raffinés basés sur des calculs d'évolution à l'échelle de l'assemblage. Les résultats montrent des écarts significatifs, essentiellement induits par la modélisation de la fabrication du combustible. Ces travaux ont été poursuivis par Maxime Paradis dans le cadre d'un CDD de 6 mois à l'IJCLab, en 2021-2022, durant lequel il a élaboré des modèles REP des différents paliers historiques avec DONJON pour reconstruire une simulation du parc français avec le code de scénario CLASS. Ces travaux seront poursuivis dans le cadre de la thèse de Sarah Eveillard, co-encadrée par l'IJCLab et le CEA, qui démarrera en janvier 2023 et visera à élaborer une méthodologie de modélisation de gestions combustibles de multirecyclage du plutonium en REP basée sur des calculs à l'échelle du cœur.

L'analyse des incertitudes relatives aux biais de modélisation physique a également été soutenue par l'élaboration et la coordination du projet international FIT (Functionality Isolation Test) [16]. Le but du projet FIT est d'améliorer la confiance dans les sorties des codes de simulations dynamiques du cycle du combustible nucléaire. De nombreux benchmarks basés sur ce type d'outil existent, mais ils concernent usuellement des calculs complexes avec de nombreux réacteurs de type différent sur des échelles de temps relativement longues. Le projet FIT se démarque de ces benchmarks en proposant des comparaisons « locales » qui se concentrent sur les fonctionnalités développées dans les codes. Le but est de quantifier l'impact d'une fonctionnalité et d'étudier la propagation de cet impact dans le cycle, au sein d'une communauté internationale utilisant de nombreux simulateurs du cycle nucléaire. Une publication associée au premier exercice réalisé dans le cadre du projet a été publiée dans une revue scientifique à comité de lecture. Cet exercice a permis de tester la fonctionnalité « modèle de chargement du combustible neuf » et a montré qu'un modèle de chargement basé sur la physique des réacteurs est indispensable pour les combustibles recyclés.

Le traitement des incertitudes relatives aux données permettant de décrire le parc nucléaire historique fait actuellement l'objet de travaux à l'IJCLab dans le cadre de CINEASTE. Ces travaux ont pour but d'élaborer une méthodologie permettant de propager, dans la simulation de scénario, l'incertitude associée aux données historiques (date de démarrage et de changement de gestion des réacteurs, burn-up des gestions combustibles, temps de refroidissement des combustibles usés...).

3.2. Apport de la sociologie à la fabrique des scénarios

Au-delà des aspects techniques de modélisation et des sources d'incertitudes quantifiables, l'élaboration de scénarios s'inscrit dans un cadre d'incertitude profonde, où les contextes futurs, par définition imprédictibles, sont fortement influencés par les décisions ou comportements humains et impactés par des crises non anticipées. Dans ce contexte, l'analyse sociologique vise à comprendre le rôle et les usages des scénarios dans les prises de décisions politiques et industrielles relatives à l'énergie du futur.

Cet axe de recherche s'appuie sur la dynamique de recherche interdisciplinaire initiée par des chercheurs en sociologie de l'IMT Atlantique et en physique de l'IN2P3 et du CEA autour du rôle et des usages des scénarios. Cette problématique a été traitée lors de projets antérieurs dans le cadre desquels un dispositif méthodologique original a été mis en œuvre : le focus group. Cette méthodologie permet des échanges croisés et libres sur la base d'un guide d'entretien, entre des acteurs aux parcours et professions différentes, d'une même communauté de pratiques. Les objectifs étaient d'une part, de saisir la manière dont des professionnels des mondes politique, industriel et académique conçoivent, pensent, mobilisent et

opérationnalisent le(s) scénario(s) (nucléaire) et d'autre part, de qualifier en quoi les choix scientifiques, technologiques et politiques en sont transformés [17]. Dans le cadre des collaborations antérieures, plusieurs focus groups ont été organisés dans lesquels étaient représentées les différentes populations concernées par ces scénarios : le monde ingénierie/industriel, le monde académique et des représentants du monde politique/régulation. Ont participé des décideurs politiques, tels que Claude Birraux (ancien député) ou Peter Lyon (ancien directeur de « l'Office of Nuclear Energy » au sein du « Department of Energy » américain), des représentants de la sûreté/régulation comme André-Pierre Lacoste (ancien directeur de l'ASN) ou encore Jacques Repussard (ancien directeur de l'IRSN).

Dans le cadre de la 5e édition du Technical Workshop on Fuel Cycle Simulation, organisée en 2021 par les membres du projet CINEASTE, une « International Panel Discussion » animée par S. Tillement, a permis d'interroger des acteurs industriels clés issus de l'industrie nucléaire française (Jérôme van der Werf, EDF), russe (Alexey Likhov, Rosatom), états-unienne (Jeffrey R. Cooper, ACO) et anglaise (Daniel Mathers, NIRO). Cette session spéciale fut centrée sur deux thématiques clés, fortement liées aux problématiques #1 et #2 du projet CINEASTE et dont l'objectif était de mettre en évidence les incertitudes auxquelles les décideurs sont confrontés ainsi que le rôle des scénarios dans la gestion de ces incertitudes. Le décideur industriel est soumis au même contexte d'incertitude profonde que le décideur politique. Pour cet acteur, l'évolution de la puissance installée conditionnée par la prolongation des centrales actuelles, mais surtout par les décisions de construction de nouvelles centrales est une donnée exogène. C'est dans ce cadre incertain que l'industriel définit et met en œuvre une stratégie de cycle et de gestion des matières basées sur des temporalités multiples (courtes, moyennes et longues).

L'analyse des données collectées depuis plus de 5 ans a permis de montrer que le concept de scénario couvre une grande diversité de définitions et de rôles. À titre d'exemple, le scénario peut être vu comme un « outil d'aide à la décision » bien qu'il puisse aussi apparaître dans d'autres circonstances comme « une grande boîte noire ». Il est également perçu par certains acteurs comme étant un « mode de production d'un discours commun ». Qu'il soit nucléaire ou non, le scénario peut être vu comme un « objet-frontière ». En effet, il supporte la construction, représentation, circulation des savoirs entre des mondes sociaux distincts (allant des chercheurs académiques aux industriels, en passant par des acteurs « politiques » ou « institutionnels ») et des disciplines scientifiques différentes (physique, économie, sociologie, etc.). Le scénario apparaît ainsi comme un vecteur de discussion, de débats et de mise en forme d'actions collectives. De nombreux rôles joués par le scénario ont été mis en évidence, par exemple leur capacité à explorer le futur, à déconstruire des rhétoriques ou encore à justifier des décisions déjà prises. Si la grande diversité des scénarios proposés peut parfois neutraliser les messages qu'ils portent, elle est aussi nécessaire pour renforcer la pertinence des idées en offrant un espace de confrontation des visions [17].

Deux aspects relatifs aux rôles et usages des scénarios dans la prise de décision relative à l'énergie du futur, issus de ces analyses, interpellent particulièrement les scénaristes de CINEASTE. Le premier est le « conflit de temporalités », associé à la contradiction entre l'horizon temporel du politique (court terme) et celui de la prospective énergétique (long terme). Le découplage entre ces deux temps caractéristiques limite les possibilités d'anticipation et participe au contexte d'incertitude profonde. Ces conditions particulières remettent en cause la capacité des scénarios à contribuer à la prise de décisions robustes sur le temps long. Le second concerne l'identification des critères intervenant dans la prise de décision. Les déterminants techniques seuls ne suffisent souvent pas à contraindre les décisions. L'influence de certains phénomènes analysés par la sociologie des organisations (dépendance au sentier, problématique des compétences, etc.) apparaît importante. Les critères technico-économiques occupent également une place centrale dans le processus de décision.

Ces analyses sont au cœur de la construction méthodologique dans CINEASTE : le premier aspect conduit à élaborer des méthodologies innovantes de construction et d'analyse des scénarios nucléaires en s'appropriant de nouveaux concepts pour transcrire le « conflit de temporalité ». Le second aspect renforce l'intérêt pour l'élaboration de critères technico-économiques au cœur de la modélisation des scénarios

électriques et énergétiques. Ces résultats sont décrits dans le rapport final des projets PRISE et PISE publié par Stéphanie Tillement et dont la référence est spécifiée dans la section 3.5.

3.3. Conflit de temporalité – concepts de résilience et robustesse

L'analyse du « conflit de temporalités » a mis en évidence la nécessité de mettre en œuvre un formalisme adapté dans la construction et l'analyse des scénarios. Les concepts de « résilience » et « robustesse » empruntés au cadre théorique de la sociologie des organisations semblent constituer une base sur laquelle construire ce formalisme. L'appropriation de ces concepts par les physiciens s'est principalement appuyée sur les travaux réalisés dans le cadre de deux thèses.

Tout d'abord, la thèse de Weifeng Zhou [22] au CEA Cadarache soutenue le 14 octobre 2020 s'est intéressée au concept de résilience appliquée aux scénarios nucléaires. L'objectif de cette thèse fut de proposer un paradigme innovant pour l'étude de résilience adaptée aux scénarios électronucléaires afin d'affronter l'impact des disruptions causées par les incertitudes. Les concepts de résistance, résilience et robustesse ont ensuite été retranscrits et formalisés à travers le prisme du scénario nucléaire. Weifeng Zhou a finalement défini une méthode basée sur le krigeage pour prédire des trajectoires résilientes à une disruption des paramètres.

La thèse de Jiali Liang [23] au CNRS/IJCLab, soutenue le 7 juillet 2021, est complémentaire à celle de Weifeng Zhou. Elle vise à développer une méthodologie de recherche de stratégies robustes à une disruption des objectifs. Cette méthode a été appliquée à un parc simplifié représentatif du parc nucléaire français. Deux approches ont été testées : la robustesse statique et la robustesse adaptative. Ce travail original a notamment permis de mettre en lumière les problématiques de temporalités dans la mesure d'un indicateur de résilience ou de robustesse, et de montrer que les processus d'adaptabilité sont des facteurs clés de la robustesse du parc.

Les travaux de ces deux thèses ont permis de montrer que la quantification de la résilience d'un parc nucléaire nécessite d'intégrer la dépendance temporelle dans la méthodologie. Un effet, un parc nucléaire particulier peut être identifié résilient au regard des marges de fonctionnement ou encore de l'objectif assigné sur une période temporelle donnée (par exemple 30 ans) mais ne le sera plus sur une période temporelle différente ou plus longue.

En conséquence, il importe d'intégrer une dépendance temporelle pour l'estimation de la résilience. Ainsi, un indicateur de la résilience pourrait être défini comme la durée nécessaire à un parc nucléaire pour retrouver un état fonctionnel. Cependant, cette formulation de la résilience nécessite de définir sans ambiguïté la « fonction de base » du système, qui dans le cas d'un parc nucléaire peut être multiple (assurer la production d'électricité, stabiliser ou minimiser les inventaires en matières nucléaires, minimiser le recours à la ressource naturelle ou encore la production de déchets, etc.).

3.4. Analyse technico-économique de transitions énergétiques

Le parc nucléaire étant une composante essentielle du parc électrique, la fonction du parc nucléaire ne peut pas se dissocier de celle du système électrique voire énergétique. Il est donc nécessaire, dans la mesure du possible, d'agrandir la focale et de prendre en compte dans l'analyse des considérations pertinentes à l'échelle du système électrique. De plus, la mise en évidence de l'importance des déterminants technico-économiques dans le processus de décision relatifs à l'énergie du futur conforte l'intérêt que nous portons depuis de nombreuses années à l'analyse technico-économique. Cet axe fut, ces deux dernières années, traité dans le cadre de plusieurs stages co-encadrés.

La première approche de modélisation étudiée est le calcul du coût actualisé de l'électricité (LCOE). Cette approche constitue une porte d'entrée simple sur le calcul économique, et permet d'acquérir une vision de la ventilation des différents postes (coûts d'investissement, d'opération et maintenance, des déchets et du démantèlement...). Elle a été utilisée dans le cadre de deux stages. Le stage d'Aimeric Eustache [24], réalisé

au DER/SPRC/LE2C en 2021 et co-encadré par Fanny Courtin et par Nicolas Thiollière, a visé à développer un outil de calcul de coût actualisé de l'électricité nucléaire et de réaliser un couplage avec le code de scénario COSI7. Le stage de Sibylle Martin-Lauzer [25] réalisé au DER/SESI et encadré par Stéphane Cathalau a visé à modéliser des mix énergétiques et à les optimiser selon un critère de minimisation du coût actualisé de l'électricité tout en assurant l'égalité entre l'offre et la demande d'électricité. Les travaux d'Aimeric et de Sibylle ont pu être présentés dans le cadre d'un workshop sur la technico-économie organisé dans le cadre de CINEASTE. Les discussions engagées concluent que cette métrique porte plusieurs biais. Par exemple, elle ne prend pas en compte les coûts du système, la régulation ou encore la tarification. En ce sens, les économistes présents au workshop confirment que l'approche « LCOE » n'apparaît plus comme une métrique suffisante pour analyser les scénarios et pourrait progressivement être remplacé par des approches plus rigoureuses. Plusieurs thématiques de recherche d'intérêt émergent lors de cette discussion comme la gestion des réseaux, la flexibilité du parc électrique, le couplage avec d'autres sources de production que l'électrique (hydrogène/chaleur...), ou encore la prise en compte des coûts de système.

La seconde approche étudiée s'est basée sur des recherches de modélisation hybrides visant à évaluer les conséquences économiques et énergétiques des scénarios de transition énergétique et s'appuie sur deux stages. Les stages de Corentin Simon [26] et d'Océane Daëron [27], réalisés en 2020 et 2022 et co-encadrés par Nicolas Thiollière et Lionel Lemiale, visaient à comprendre les mécanismes en jeu dans une économie à l'équilibre général à travers la construction d'un outil de simulation intégrant une représentation désagrégée du secteur de l'énergie. Ces modélisations se sont finalement avérées complexes à mettre en œuvre pour deux raisons. Tout d'abord, elles nécessitent la définition d'un modèle dynamique qui apparaît comme un objectif très ambitieux pour le projet à très court terme. Ensuite, la calibration d'un tel modèle, basé sur la construction d'une matrice de comptabilité sociale, nécessite un accès à des données économiques très détaillées et fortement désagrégées. Cette étape constitue un effort fastidieux ne pouvant être correctement abordé dans le cadre d'un stage. Le développement d'un tel outil de modélisation reste une priorité pour la communauté CINEASTE même si nous estimons que la réalisation d'un modèle opérationnel et robuste sur le plan économique prendra plusieurs années.

3.5. Publications liées au projet CINEASTE

1. F. Courtin et al (2021). Assessment of plutonium inventory management in the French nuclear fleet with the fuel cycle simulator CLASS. Nuclear Engineering and Design, 377, 111042.
2. M. Guillet, et al. Coupled CLASS and DONJON5 3D full-core calculations and comparison with the neural network approach for fuel cycles involving MOX fueled PWRs. Annals Nucl. Energy, 2020, pp.107971.
3. J. Liang, et al. "Robustness Study of Electro-Nuclear Scenario under Disruption." Journal of Nuclear Engineering 2.1 (2021): 1-8.
4. J. Liang, et al. "Assessment of strategy robustness under disruption of objective in dynamic fuel cycle studies." Annals of Nuclear Energy 154 (2021): 108131.
5. J. Liang. Robustness study of electro-nuclear scenarios: Evaluate the capacity of Sodium-cooled Fast Reactor deployment strategies to adapt to changes of objectives. PhD, 2021
6. M. Paradis et al. "DONJON5/CLASS coupled simulations of MOX/UO2 heterogeneous PWR core." EPJ Nuclear Sciences & Technologies 8 (2022): 4.
7. N. Thiollière et al. "Impact of fresh fuel loading management in fuel cycle simulators: A functionality isolation test." Nuclear Engineering and Design 392 (2022): 111748.
8. W. Zhou et al. Resilience of nuclear fuel cycle scenarios: Definition, method and application to a fleet with uncertain power decrease. International Journal of Energy Research. December 2020.
9. W. Zhou. Resilience analysis of nuclear fuel cycle scenarios. PhD, 2020.

10. S. Tillement. Projets PRISE – PISE, Rapport final - L'influence des études de scénario sur les prises de décision relatives à l'énergie du futur. 2018.

4. TRAVAUX CITES

[1] GIEC, « Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat,» Genève, Suisse, 2014.

[2] ONU, «Sommet Action Climat,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.un.org/fr/climatechange/>.

[3] P. Pierson, «Increasing Returns, Path Dependence, and the Study of Politics,» The American Political Science Review, vol. 94, n°12, 2000.

[4] C. d. Perthuis, La “ transition énergétique ” : Les ambiguïtés d'une notion à géométrie variable., HAL Id: hal-01504615, 2017.

[5] Ministère de la transition énergétique, « Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TEPCV),» promulguée le 18/08/2015.

[6] Ministère de la Transition énergétique, « Stratégie Nationale bas-carbone révisée, », Mars 2020.

[7] Ministère de la transition énergétique, « Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028,» <https://www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>, 2020.

[8] Commission Nationale du Débat Public, «CNDP - PNGMDR,» [En ligne]. Available: <https://www.debatpublic.fr/plan-national-gestion-matieres-dechets-radioactifs-pngmdr>.

[9] Autorité de Sureté Nucléaire, «Plan National de Gestion des Matières et des Dechets Nucléaires,».

[10] Ministère de la transition énergétique, «Travaux relatifs au nouveau nucléaire,», Février 2022.

[11] J. Percebois, «Prospectives énergétiques: Quelles méthodes, quels critères,» La lettre de l'I-tésé, vol. 16, 2012.

[12] S. L. Star et J. R. Griesemer, «Institutional Ecology, 'Translations', and Boundary Objects: Amateurs and Professionals,» Social Studies of Science, vol. 19, n° 13, 1989.

[13] Guillaume Martin, Maxime Guyot, Frédéric Laugier, Gérald Senentz, Guillaume Krivtchik et et al, «FRENCH SCENARIOS TOWARD FAST PLUTONIUM MULTI-RECYCLING IN PWR,» chez ICAPP, Charlotte, USA, 2018.

[14] Fanny Courtin, «Étude de l'incinération du plutonium en REP MOX sur support d'uranium enrichi avec le code de simulation dynamique du cycle CLASS,» Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2017.

[15] Guillaume Krivtchik, Patrick Blaise et Christine Coquelet-Pascal, «Artificial neural network surrogate development of equivalence models for nuclear data uncertainty propagation in scenario studies,» EPJ Nuclear Sci. Technol., vol. 3, n° 122, 2017.

[16] Nicolas Thiollière et et al, «A methodology for performing sensitivity analysis in dynamic fuel cycle simulation studies applied to a PWR fleet simulated with the CLASS tool,» EPJ Nuclear Sci. Technol., vol. 4, n° 113, 2018.

[17] Stéphanie Tillement. Rapport final - L'influence des études de scénario sur les prises de décision relatives à l'énergie du futur. 2019.

- [18] Réseau de Transport de l'électricité, «Futurs énergétiques 2050,» <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>, 2021.
- [19] Guillaume Krivtchik - Analysis of uncertainty propagation in nuclear fuel cycle scenarios. PhD, CEA. 2015.
- [20] Martin Guillet - Prise en compte des calculs de cœur via l'utilisation de DONJON5 pour le code de scénario nucléaire CLASS et évaluation. Masters thesis, Polytechnique Montréal. 2019.
- [21] Maxime Paradis. Prise en compte de la chaîne de calcul Dragon5/Donjon5 dans la simulation de réacteurs à eau sous pression hybride via CLASS. Masters thesis, Polytechnique Montréal. 2021.
- [22] Weifeng Zhou. Resilience analysis of nuclear fuel cycle scenarios. PhD, CEA. 2020.
- [23] Jialy Liang. Robustness assessment in electro-nuclear scenario studies: evaluate the capacity of Sodium-cooled Fast Reactor deployment strategies to adapt to changes of objectives. PhD IJCLab, Orsay. 2021.
- [24] Aimeric Eustache. Développement d'un outil de calcul de coût actualisé de l'électricité nucléaire et couplage avec COSI7. Stage de Fin d'étude, CEA Cadarache. 2021.
- [25] Sybille Martin Lauzère. Modélisation temporelle et technico-économique de scénarios de mix énergétique d'un pays émergent fictif sous contraintes externes. Stage de fin d'étude, 2021.
- [26] Corentin Simon. Évaluation des conséquences économiques et énergétiques des scénarios de transition énergétique le rôle de l'énergie incorporée. Stage M2, Université de Nantes. 2020.
- [27] Océane Daeron. Construction d'un modèle économique de transition énergétique. Stage M1, IMT Atlantique, 2022.

Exposé scientifique du projet (10 pages maximum) explicitant les points suivants :

Cette section vise à décrire la nouvelle orientation du projet pour l'année 2023 et justifier la demande de soutien financier associée. Le bilan du projet CINEASTE pour la période 2020 – 2022 se trouve dans la partie précédente.

1. PROBLEMATIQUE

Nous avons montré dans la partie relative au bilan du projet CINEASTE que la collaboration avec le département de sociologie de IMT Atlantique a conduit à remettre en question nos pratiques de scénarisation (construction des hypothèses, modélisation et analyse des sorties).

Nous avons également montré que les déterminants technico-économiques sont importants dans le processus de décision relatif à l'énergie du futur et que la prise en compte de considérations pertinentes à l'échelle du système électrique était nécessaire.

Penser le futur du parc électronucléaire implique de faire des hypothèses sur l'évolution de la production nucléaire. Ce paramètre, exogène dans le cas de scénarios nucléaires, est un paramètre déterminant de l'évolution des inventaires de matières calculée par les outils de modélisation dynamique du cycle nucléaire. Il existe de réelles difficultés concernant l'évaluation fiable des valeurs possibles de l'évolution de la production nucléaire tant la visibilité est relativement court terme. Les processus de décision complexes relatifs au nucléaire du futur ainsi que le conflit de temporalité qui caractérise la décision politique dans ce cadre impliquent une incertitude profonde qu'il est nécessaire d'aborder du point de vue académique avec des outils et des concepts adaptés.

Les concepts de résilience et de robustesse ont permis de définir de nouvelles méthodologies de scénarios nucléaires qui ont fait l'objet de deux thèses [1, 2] et d'articles dans des revues à comité de lecture [3,4,5]. Les travaux menés ont permis de montrer, entre autres :

- la difficulté liée à la formalisation des concepts de résilience et robustesse d'un système,
- la complexité de définir « l'état fonctionnel » du système,
- l'importance de la prise en compte d'une dépendance temporelle,
- la diversité des disruptions auxquelles peut être soumis le système,
- la difficulté liée à la définition des leviers autorisés pour ramener le système dans son état fonctionnel.

Nous souhaitons poursuivre nos travaux de formalisation des concepts de résilience et robustesse sur le long terme notamment via l'analyse des leviers pouvant être mis en œuvre et des incertitudes associées, selon les temporalités considérées. Ces réflexions s'appuieront sur un stage à l'IJCLab en 2023. Nous proposons également d'enrichir notre réflexion sur ces aspects via l'analyse sociologique de l'appréhension de ces concepts par les acteurs confrontés à la construction et l'usage des scénarios (cf. section 3.2).

Dans nos études de résilience et robustesse de parc nucléaire, l'évolution de la production nucléaire est une donnée exogène qu'il convient de définir. Nous souhaitons dans le cadre de la poursuite du projet CINEASTE endogénéiser cette donnée d'entrée. C'est-à-dire faire en sorte que la production nucléaire soit la résultante de calculs technico-économiques à l'échelle du parc de production électrique réalisés en amont. Cela permettra également d'intégrer aux études menées dans CINEASTE un couplage fort entre les études techniques et économiques. En effet, le cadre systémique le plus adapté pour réaliser l'endogénéisation de l'évolution de la production nucléaire est le parc électrique. Le système électrique est constitué des secteurs de la production, du transport, de la distribution et de la fourniture de l'électricité ainsi que du secteur de la consommation. L'équilibre entre la production et la consommation est assuré en pratique par le gestionnaire réseau (RTE en France).

De nombreuses études de prospectives publiées visent à produire des évaluations des trajectoires d'évolution du mix électrique français à l'horizon 2050-2060 [6,7]. En parallèle, il existe de nombreux signaux allant dans le sens de la montée en puissance des énergies renouvelables (ENR) non pilotables dans le mix électrique, à l'échelle de la France, mais aussi de l'Union européenne.

Cette augmentation de la part des ENR dans le mix a plusieurs effets :

- Perturbation des marchés de l'électricité par décalage du « merit order » et diminution du prix moyen d'équilibre de l'électricité sur le marché de gros impliquant des problématiques de rémunération des moyens de production [8].
- Augmentation des besoins de flexibilité à l'échelle du parc électrique se traduisant par un recours accru au stockage, au suivi de charge des moyens pilotable, aux pertes de productibles ou encore à l'effacement/gestion intelligente de la consommation [9].

Nous nous intéressons dans le cadre du projet CINEASTE à ce dernier effet. L'interaction spécifique entre le nucléaire et les ENR fait l'objet de nombreux travaux [9,10,11]. Le fait que le nucléaire français soit historiquement relativement flexible permet d'envisager ce couplage sur la base d'un retour d'expérience conséquent et de données techniques fiables [12,13].

Les réflexions sur la flexibilité du nucléaire impliquent également de prendre en compte l'effet cycle associé à travers :

- l'impact sur le choix des technologies et des combustibles à déployer ;
- l'impact sur les évolutions des matières (uranium, plutonium, actinides mineurs et produits de fission).

Les simulations dynamiques du cycle sont les outils les mieux adaptés pour évaluer ces effets [14,15] et sont historiquement à la base du projet CINEASTE et des projets antérieurs financés dans le cadre de NEEDS.

Nous proposons de nous inscrire dans la continuité de ces travaux via la mise en œuvre d'un couplage pertinent entre les modélisations technico-économiques et les simulations de réacteurs et du cycle. La problématique identifiée est précisée ci-dessous :

« Comment qualifier et quantifier la résilience d'un parc électrique face à une disruption (ou perturbation) de la disponibilité nucléaire ? »

Le consortium CINEASTE est renforcé pour l'année 2023 par l'intégration de nouveaux partenaires engagés historiquement dans cette problématique et soucieux d'entreprendre et de développer des approches interdisciplinaires et inter-instituts.

2. COMMUNAUTE ET OUTILS DE MODELISATION

La communauté CINEASTE pour l'année 2023 va s'appuyer sur les équipes et les outils de simulation suivants :

- CEA Cadarache

=> SPRC: Fanny Courtin, Aimeric Eustache, Kévin Tirel, Sarah Eveillard

=> SESI : Jean-Baptiste Drouin

Codes associés

APOLLO2/Cronos – Transport déterministe et évolution

SEPAR – Calcul de mise à l'équilibre à l'échelle du cycle

COSI – Simulation dynamique du cycle

- CEA Saclay

=> ITésé : Sophie Gabriel

Codes associés

ANTARES – Simulation technico-économique du mix électrique

=> SERMA : Jean-Michel Do

Codes associés

AST-PWR – Transitoire et suivi de charge nucléaire

PERSÉE – Simulation technico-économique du mix électrique

APOLLO3® – Transport déterministe, code cœur et évolution

- CNRS/IN2P3

=> Subatech Nantes : Nicolas Thiolliere

=> IJC Lab Orsay : Xavier Doligez, Marc Ernoult

Codes associés

CLASS – Simulation dynamique du cycle

SERPENT – Transport Monte-Carlo et évolution

SMURE – Transport Monte-Carlo et évolution

Dragon/Donjon – Transport déterministe, code cœur et évolution

- Nantes Université

=> IAE : Lionel Lemiale

Codes associés

EcoNuke – Simulation technico-économique du mix électrique

- IMT Atlantique

=> LEMNA : Stéphanie Tillement

Analyses réflexives du lien entre résilience et pratique de scénarisation (identification et catégorisation des disruptions et des objectifs majeurs pris en compte dans les études de scénarios)

Les outils disponibles permettent de modéliser de nombreux phénomènes économiques et physiques. Le projet CINEASTE 2023 vise à mettre en place et à initier la résolution de l'exercice décrit dans le paragraphe suivant.

3. EXERCICE 2023

3.1. Design d'une simulation de référence 2023

La première étape de l'exercice 2023 consiste à mettre en œuvre un calcul académique de référence basé sur une trajectoire d'évolution du mix électrique exogène à l'horizon 2060 (Figure 1). La trajectoire de référence sera calée sur la trajectoire de référence de la consommation issue de l'étude RTE publiée en 2021. La production électrique s'appuiera sur le mix électrique définie par le scénario « N3 » de RTE qui implique une puissance installée de 40 GW d'EPR et de 4 GW de SMR.

Cette trajectoire d'évolution du parc nucléaire sera discutée au sein du consortium de manière à identifier les combustibles à déployer (UOX, MOX et/ou multi-recyclage du Pu). Les simulations produites par le CEA/SERMA vont permettre de définir les capacités de suivi de charge des réacteurs en fonction du combustible mis en œuvre. Il va falloir pour cela adapter le simulateur au pilotage des EPR2 (mode T) et des SMR qui diffère du mode G utilisé dans les réacteurs flexibles du parc nucléaire actuel.

La simulation de l'évolution du mix électrique sera réalisée par le modèle technico-économique de dispatch EcoNuke qui calcule l'optimum économique de la trajectoire sur un pas en temps horaire ou demi-horaire pour une année. Les moyens de production pilotables hors nucléaire du mix électrique seront également décrits par leurs capacités de suivi de charge estimées à partir des données de la littérature. Les productions ENR (solaire et éolienne) seront issues des chroniques représentatives disponibles. La simulation de la trajectoire de référence suppose alors une succession d'appels à EcoNuke pour chaque année simulée jusqu'à l'année 2050. Les sorties de ces simulations seront composées de l'évolution du mix électrique, c'est-à-dire des facteurs de charge des différents moyens de production (nucléaires et complémentaires), des besoins en flexibilité et des coûts du système électrique.

Actuellement, EcoNuke intègre deux technologies de réacteurs nucléaires : un macro-réacteur flexible, c'est-à-dire ayant des capacités de suivi de charge relativement bonnes et un macro-réacteur non flexible pour lequel cette capacité est nulle. Nous envisageons de désagréger le nucléaire flexible en définissant l'intégralité des réacteurs étant amenés à fonctionner en suivi de charge. De cette manière, nous pourrions définir des paramètres de ramping précis qui dépendront des paliers concernés. Les paramètres de ramping à intégrer au modèle EcoNuke seront discutés puis définis avec nos collègues du CEA/SERMA. Une fois le modèle EcoNuke correctement implémenté, nous serons en mesure de réaliser des études de sensibilité sur les paramètres de ramping afin de comprendre l'interaction fine entre le nucléaire et les besoins de flexibilité.

Les données relatives à l'évolution de la production nucléaire seront ensuite utilisées en entrée des outils de simulation dynamique du cycle du combustible (CLASS et COSI). L'objectif de cette étape est de modéliser le parc nucléaire et d'analyser l'impact de la flexibilité sur les principales données du cycle nucléaire. Intégrer le suivi de charge des réacteurs dans la simulation du cycle nécessite de développer de nouvelles fonctionnalités dans les outils. Des calculs préliminaires de simulations d'évolutions de réacteurs sur une campagne pourront être réalisés en amont afin de fixer les ordres de grandeur. Dans un second temps et si cela s'avère significatif, il conviendra de définir et d'implémenter la mise en œuvre du suivi de charge fin dans les outils de simulation du cycle.

Une fois le calcul de référence parfaitement calibré, nous réaliserons alors un scénario de disruption de la disponibilité du nucléaire. Concrètement, nous envisagerons l'indisponibilité de N réacteurs pendant une durée de X années (N et X étant à définir) avant d'implémenter cette indisponibilité dans les modèles technico-économiques de dispatch. La capacité d'adaptation du parc électrique sera alors évaluée via les besoins en flexibilité additionnels à mettre en œuvre pour maintenir la fonction du parc, ici définie comme la capacité à assurer la demande. Nous serons alors en mesure de définir un premier paramètre d'évaluation de la résilience du parc électrique.

À l'échelle du parc nucléaire, il conviendra de mettre à jour les facteurs de charge des réacteurs et de refaire la simulation du cycle avec ces nouvelles contraintes liées à la disruption de la disponibilité du nucléaire. Nous pourrions alors évaluer l'impact de cette disruption sur les paramètres de fonctionnement des usines (en termes de flux et de stocks) afin de vérifier qu'ils restent à l'intérieur des domaines de validité [2] définis en amont. Cette vérification permettra de définir un paramètre d'évaluation de la résilience à l'échelle du parc nucléaire, en complément de celui du parc électrique.

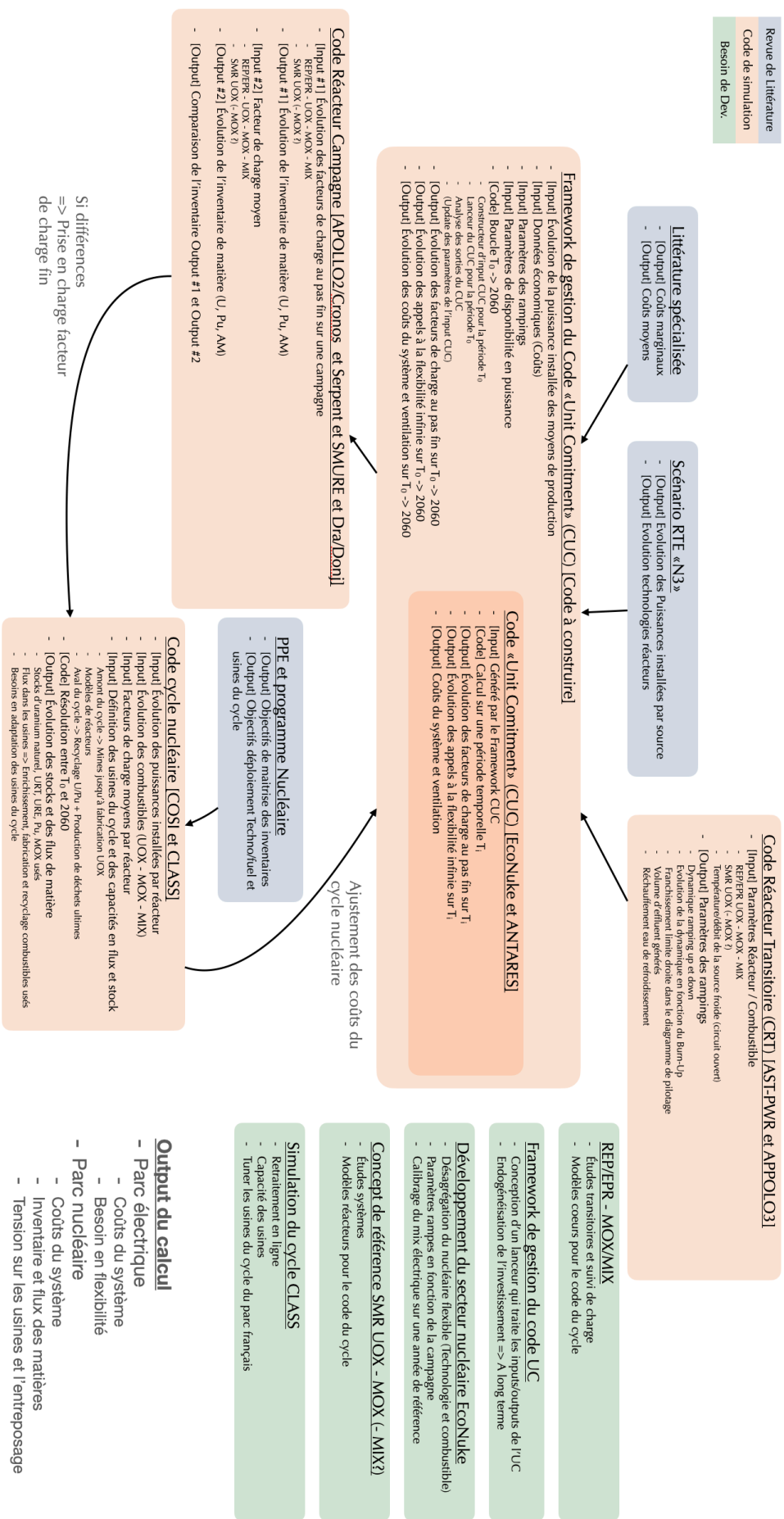


Figure 1. Schéma de calcul de référence sans interruption

3.2. Analyse réflexive 2023 : résilience et scénarisation

Les premiers focus-groups, ainsi que les interventions de représentants des mondes politique ou industriel lors des Fuel Cycle Workshop, ont montré que les acteurs en charge de la définition des politiques énergétiques / stratégies industrielles étaient confrontés à des incertitudes majeures, techno-politiques ou socio-organisationnelles, complexes et difficilement gérables. Ils ont également discuté en quoi les scénarios pouvaient (ou non) aider à la gestion de ces incertitudes. Parallèlement, les travaux menés autour de l'appropriation des concepts de résilience et robustesse nous ont conduits à nous questionner sur l'unicité d'une définition de l'état fonctionnel du système, ici le parc nucléaire et son cycle associé, ainsi que sur la nature des disruptions à considérer. Ces disruptions peuvent être multiples (changement de stratégie, indisponibilité des usines, baisse de puissance installée, etc.) et nécessitent de définir un ordre de priorité dans leur traitement. Par ailleurs, ces disruptions ou perturbations n'ont de sens qu'en référence à l'objectif (ou aux objectifs) assignés aux systèmes considérés.

Dans la lignée de ces travaux, l'analyse réflexive vise à qualifier plus précisément la nature des disruptions considérées ou à considérer dans le travail de scénarisation ; la pertinence du concept de résilience à propos des études de scénario et sa définition ; les objectifs ou critères prépondérants auxquels le système électrique (et/ou nucléaire) doit répondre. L'approche défendue est systémique et dynamique : l'ensemble des composants du système et les interdépendances entre ceux-ci sont considérés, tout comme les évolutions du système au cours du temps. L'analyse se centre sur les dimensions suivantes :

1. Scénarisation et résilience : face à quelles disruptions ?

1.a. Identifier et qualifier les disruptions que les acteurs prennent ou devraient prendre en compte et auxquels ils font face, selon leur appartenance institutionnelle et leur rôle

1.b. Comment leur nature, leur prise en compte et leur priorisation évoluent selon le monde social considéré (i.e. industriel, politique, régulateur, etc.) ?

2. Scénarisation et résilience : pour quels objectifs ?

2.a. Identifier les grands objectifs associés au système modélisé et à la définition de sa résilience ; le système nucléaire étant ici central, deux enjeux ou objectifs seront particulièrement discutés, la sûreté (ou sécurité au sens large) et la durabilité (sustainability)

2.a.i. Comment sont-ils pris en compte (s'ils le sont) dans la construction des scénarios ? quelles contraintes sont-elles associées à cette prise en compte (aujourd'hui et dans le futur) ?

2.a.ii. Quelles sont les interactions entre ces objectifs (complémentarité, incompatibilité) ? avec quelles conséquences pour le travail de scénario ?

3. Scénarisation et résilience : quelle influence des temporalités ?

3.a. Quelles échelles de temps sont-elles pertinentes pour penser la résilience ?

3.b. Quels conflits de temporalités peuvent affecter la qualité des scénarios produits et les stratégies / politiques reliées (passé / présent / futur, temps politique / temps nucléaire, etc.) ?

Afin de répondre à ces questions, nous proposons d'employer à nouveau une méthodologie qualitative, fondée principalement sur l'organisation de focus-groups (complétés le cas échéant par des entretiens individuels ciblés), cette démarche d'enquête ayant montré sa pertinence précédemment pour mettre en évidence la diversité des points et leur singularité selon le monde social considéré.

4. DEMANDE DE FINANCEMENT

La demande de financement pour l'année 2023 vise à financer les missions de la collaboration dans le cadre du projet CINEASTE, des stages de master 2 ainsi qu'une thèse co-encadrée CEA/CNRS.

4.1. Missions de collaboration – 7 k€

Une réunion de lancement aura lieu en début d'année 2023 avec l'ensemble des partenaires du projet CINEASTE. Cette réunion, programmée du 25 au 27 janvier 2023 à Paris et réunissant une dizaine de chercheur.e.s, aura les objectifs suivants :

- Présentation des travaux des différentes disciplines du projet
- Définition précise des jalons et des paramètres de l'exercice 2023
- Mise en place d'une roadmap opérationnelle pour l'année 2023

D'autres réunions plus « disciplinaires » seront organisées au fil de l'eau en 2023, notamment pour discuter et définir les paramètres de rampings des réacteurs qui seront utilisés dans les simulations technico-économique et du cycle nucléaire.

Nous prévoyons également une réunion à l'automne 2023 afin d'initier les réflexions relatives à l'organisation du « Technical Workshop on Nuclear Fuel Cycle Simulation » de 2024 qui sera organisé en France. Le site web du dernier évènement que nous avons organisé en 2021 est disponible à l'adresse ci-dessous :

<https://fcw2020.sciencesconf.org>

4.2. Stages de master 2 – 3 k€

Un stage de master 2 sera proposé à IMT Atlantique pour le premier semestre 2023. Il visera à développer le secteur du nucléaire dans l'outil de dispatching EcoNuke conçu par les économistes de l'IAE de Nantes et donc de réaliser le scénario de référence relatif à l'exercice 2023 et décrit dans la section 3.

Un stage sera réalisé à l'IJCLab en 2023 et encadré par Marc Ernoult. Il visera à poursuivre les travaux de formalisation des concepts de résilience et robustesse sur le long terme notamment via l'analyse des leviers autorisés, et des incertitudes associées, selon les temporalités considérées. Ce stage ne nécessite pas de financement dans la mesure où les fonds sont actuellement disponibles.

4.3. Demi-bourse de thèse (co-encadrement CEA/SERMA, CEA/Cadarache et Subatech)

La thèse proposée vise un démarrage en octobre 2023.

RTE a montré dans des scénarios de mix à horizon 2035 [18] qui se rapprochent des hypothèses de la PPE de 2020, qu'une quantité non négligeable 3 TWh (0,6% de la production annuelle) serait déversée en été lors des pics photovoltaïques. Ce déversement est nécessaire pour éviter un déséquilibre entre la production/consommation qui déstabiliserait le réseau électrique. Pour y faire face, RTE entrevoit plusieurs solutions :

- Flexibilité réseau : Offre de raccordement intelligente des parcs d'Énergies Renouvelables intermittentes basée sur des automates installés sur les éoliennes et les panneaux PV pour réduire la puissance produite (inclinaison des pales, dissipation d'énergie par freinage des rotors, incidence des panneaux PV). La perte de productible implique ici une indemnisation du producteur ENRi en cas de dépassement de la Puissance limite autorisée ;
- Smart Grids : gestion de la demande intelligente (utilisation des chauffe-eaux en heures pleines, pilotage de la recharge de véhicule électrique) ;
- Stockage : l'énergie stockée ne peut être rapidement restituée, car l'offre supplante la demande en été, il faut donc penser un stockage de grande capacité sur une grande échelle de temps, inter-saisonnier [19]. Il n'y a pas de technologie opérationnelle, du moins pas d'infrastructure disponible à l'heure actuelle ;

- Manœuvrabilité des réacteurs nucléaires : Concernant la manœuvrabilité des réacteurs nucléaires, la PPE actuelle est venue aussi préciser quel serait le « mix énergétique » à l'horizon 2050 avec la construction de 8 tranches EPR2, et parallèlement d'ici 2040 la fermeture programmée de 14 réacteurs nucléaires du « palier CPY-900MW » dont une partie brûle du combustible MOX [16]. Pour compenser ce manque, l'utilisation des combustibles MOX sur certains réacteurs du « palier P4-1300 MW » est donc envisagée. Ces réacteurs se verront confier deux missions, participer à la stratégie de traitement-recyclage du combustible nucléaire pour stabiliser la quantité de Pu produite et participer au besoin de flexibilité du mix électrique national. La thèse de Camille Cany [9] a montré qu'une grande partie des réacteurs brûlant aujourd'hui du MOX ne contribuent que très peu au suivi de charge alors qu'inversement les paliers P4-1300MW brûlant de l'UOX, sont eux tous sollicités.

Le doctorant investiguera si cet écart de part contributive entre les différents paliers constitue une ressource de flexibilité supplémentaire pour le mix électrique ou si pratiquement elle procède d'autres facteurs limitant, attenants au combustible MOX.

Le travail du doctorant sera d'évaluer le coût du MWe ainsi que la quantité de CO₂ émise pour l'ensemble des solutions précitées et d'apporter des réponses sur l'opportunité de ventiler éventuellement l'énergie à déverser entre ces différentes solutions.

Pour ce faire, le doctorant réalisera une étude bibliographique pour estimer ce que pourrait être les trajectoires de coûts des technologies empruntées par ces différentes voies à l'horizon 2035-2050. Après cela, son travail consistera à modéliser le système électrique français interconnecté tel qu'il est décrit dans les scénarios de mix (Futurs énergétiques 2050 RTE) et d'effectuer des études d'équilibre offre/demande et de minimisation du coût du MWe et de quantité de CO₂ émise. Pour ce faire, il pourra s'appuyer sur des logiciels de modélisation du marché électrique à l'état de l'art (Antares ou la suite logiciel TRILOGY), utilisé par I-Tésé dans ses études prospectives, ou Eco-NUKE développé par l'IAE Nantes et utilisé par Subatech Nantes. Un intérêt tout particulier sera porté sur l'intégration de règles de manœuvrabilité des différents paliers de puissance du parc nucléaire dans ces outils afin de rendre plus robuste le mix de production électrique calculé. Ces règles porteront à la fois sur le maintien de la sûreté de l'installation lors des opérations de suivi de charge mais aussi vis-à-vis du respect des contraintes environnementales [18] notamment sur les rejets thermiques qui aux horizons étudiés risquent d'impacter plus fortement les réacteurs nucléaires en circuit ouvert situés en bord du Rhône et de la Garonne [20].

Enfin la thèse devra répondre aussi à la question de savoir s'il est possible d'assurer la bonne marche des scénarios de mix électrique et celle des scénarios du cycle de combustible sur les horizons de la transition énergétique 2025-2035 (période au bout de laquelle les paliers 900MW moxés seront arrêtés), et 2035-2050 (période au cours de laquelle les EPR2 seront déployés et les P4-1300MW brûleront du combustible MIX ou MOX). Notamment, il sera intéressant d'étudier si la trajectoire de certaines observables, comme l'inventaire plutonium, restent dans leur domaine de validité lorsque sont pris en compte les possibles mix énergétiques calculés sur ces deux périodes prospectives. Si ce n'est pas le cas, le doctorant explorera s'il est possible de déterminer des scénarios du cycle résilients vis-à-vis de cette disruption en actionnant des leviers dont on dispose sur le parc nucléaire comme la technologie et la durée de vie des réacteurs ainsi que la stratégie de recyclage du combustible.

4.4. Organisation de focus group – 4000 €

Pour mener à bien l'analyse réflexive portant sur la résilience, nous aurons recours à une méthodologie déjà mise en place dans nos précédents travaux : l'organisation de « focus-groups ». Il s'agira dans un premier temps de regrouper les acteurs par monde social, puis dans un second temps d'organiser un atelier de restitution rassemblant l'ensemble des participants.

Nous avons identifié et réparti les grands acteurs à faire intervenir selon trois mondes sociaux principaux :

- le monde « politique et régulation » (DGEC, DGPR, ministères, CRE, etc.),
- le monde « R&D et industrie » (CEA, EDF, ENGIE, etc.)
- le monde académique (chercheur.e.s de différentes disciplines, en particulier physique, économie, sociologie ou sciences de gestion).

Les discussions s'articuleront autour de problématiques définies au 3.2, qui seront soumises aux différents groupes. A terme, elles permettront de s'accorder sur la définition des exigences pour le futur (futur « désirable »), les processus mis en jeu dans l'arbitrage entre ces exigences, les caractéristiques d'un système résilient, ou encore la nature et la hiérarchisation des disruptions ou autres sources de perturbation à considérer. L'analyse des données collectées dans ce cadre permettra d'éclairer la formalisation des concepts de résilience et robustesse lorsqu'il s'agit de penser une activité de scénarisation (prospective), là où jusqu'à présent l'étude de la résilience se centrait avant tout sur le fonctionnement de systèmes existants, et, partant, d'élaborer des méthodologies innovantes.

Le budget permettra ainsi la prise en charge des missions pour l'organisation des 4 ateliers, les 3 premiers faisant intervenir 4 à 6 expert.e.s, et le dernier entre 15 et 20. Ceux-ci se dérouleront à Nantes et / ou à Paris. Il permettra également d'organiser une à deux réunions de préparation des focus-groups (raffinement des grilles d'entretien et d'analyse, choix des personnes à inviter, etc.)

5. REFERENCES

- [1] J. Liang. Robustness study of electro-nuclear scenarios: Evaluate the capacity of Sodium-cooled Fast Reactor deployment strategies to adapt to changes of objectives. PhD, 2021.
- [2] W. Zhou. Resilience analysis of nuclear fuel cycle scenarios. PhD, 2020.
- [3] J. Liang, et al. "Robustness Study of Electro-Nuclear Scenario under Disruption." Journal of Nuclear Engineering 2.1 (2021): 1-8.
- [4] J. Liang, et al. "Assessment of strategy robustness under disruption of objective in dynamic fuel cycle studies." Annals of Nuclear Energy 154 (2021): 108131.
- [5] W. Zhou et al. Resilience of nuclear fuel cycle scenarios: Definition, method and application to a fleet with uncertain power decrease. International Journal of Energy Research. December 2020.
- [6] ADEME. Transition 2050. Rapport, 2021.
- [7] RTE. Futurs énergétique 2050. Rapport, 2021.
- [8] François Benhmad, Jacques Percebois. On the Impact of Wind Feed-in and Interconnections on Electricity Price in Germany. Energy Studies Review, 2016.
- [9] Camille Cany. Interactions entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables dans la transition énergétique en France : adaptations du parc électrique vers plus de flexibilité. Thèse de doctorat. 2017.
- [10] Arthur Lynch et al. Nuclear fleet flexibility: Modeling and impacts on power systems with renewable energy. Applied energy, 2022.
- [11] Rodica Loisel et al. Strategies for short-term intermittency in long-term prospective scenarios in the French power system. Energy Policy, 2022.
- [12] Valentin Drouet et al. Optimization of load-follow operations of a 1300MW pressurized water reactor using evolutionary algorithms. Physor, 2020.
- [13] Mathieu Muniglia et al. A Multi-Physics PWR Model for the Load Following. ICAPP, 2016.

- [14] Fanny Courtin et al. Assessment of plutonium inventory management in the French nuclear fleet with the fuel cycle simulator CLASS. Nuclear Engineering and Design, 377, 111042. 2021.
- [15] Nicolas Thiollière et al. A methodology for performing sensitivity analysis in dynamic fuel cycle simulation studies applied to a PWR fleet simulated with the CLASS tool. EPJN, 2018.
- [16] Stratégie française pour le climat, Programmation pluriannuelle de l'énergie, [2019-2023] [2024-2028], 20200422 Programmation pluriannuelle de l'énergie (ecologie.gouv.fr), p161
- [17] guide_2020 - centrales_nucleaires_et_environnement.pdf (edf.fr), p144, 162
- [18] Scénario prospectif VOLT équilibre offre/demande électrique, Bulletin prévisionnel RTE 2017, p238 bp2017_synthese_17.pdf (rte-france.com)
- [19] A. Clerjon. Analyse et modélisation des impacts du développement des énergies renouvelables intermittentes sur le système électrique Français : Etude du potentiel du stockage de l'électricité et de la complémentarité avec la chaleur. Thèse de doctorat. 2021
- [20] M. Nicolas, 2020. Impact du changement climatique sur les débits du XXIe siècle en France: Une estimation avec les nouvelles projections du GIEC (CMIP5) et le modèle hydrologique de l'Irstea (GR)

DEMANDE BUDGETAIRE (EN € HT) TOTAL DU PROJET	2023
	14 k€ (sans la demi-bourse de thèse)

Demandes par équipe

Unité de recherche n°1 : CEA / DES / IRESNE / DER	Montant demandé à NEEDS
	2023
Missions	
Missions workshops	2 k€
Ressources humaines (CDD, post doc et stages)	
TOTAL (€ HT)	2 k€

Unité de recherche n°2 : CEA / ITésé	Montant demandé à NEEDS
	2023
Missions	
Missions workshops	1 k€
Ressources humaines (CDD, post doc et stages)	
TOTAL (€ HT)	1 k€

Unité de recherche n°3 : CEA / SERMA	Montant demandé à NEEDS
	2023
Missions	
Missions workshops	1 k€
Ressources humaines (CDD, post doc et stages)	
Demande d'une demi bourse de thèse	(Hors budget CINEASTE)
TOTAL (€ HT)	1 k€

Unité de recherche n°4 : CNRS/IN2P3 - IJCLab	Montant demandé à NEEDS
	2023
Missions	
Missions workshops	1 k€
Ressources humaines (CDD, post doc et stages)	

TOTAL (€ HT)	1 k€

Unité de recherche n°5 : CNRS/IN2P3 – IMT Atlantique - Subatech	Montant demandé à NEEDS
	2023
Missions	
Missions workshops Subatech, IAE et LEMNA	2 k€
Organisation Focus Groups	4 k€
Ressources humaines (CDD, post doc et stages)	
Stage M2 à Subatech	3 k€
TOTAL (€ HT)	9 k€

Ajouter ici autant de tableaux que nécessaire

* Fonctionnement: fluides, petit matériel y compris informatique, consommables, prestations (heures de faisceau ...), indemnités de stage de Master...

** Equipement : sont considérées comme des **achats d'équipement** les dépenses ayant pour résultat l'entrée d'un bien destiné à rester **durablement** dans le patrimoine du laboratoire concerné, ainsi que les dépenses ayant pour effet d'augmenter la valeur ou la durée de vie d'un bien.

*** Les ressources humaines indiquées dans ce tableau concernent uniquement les financements de stages et de post-doc. Si le projet est financé, le financement est assuré pour une année. La reconduction du financement est assujéti à l'évaluation annuelle du projet et à la validation par le comité des partenaires.

Toutes les questions d'ordre budgétaire peuvent être recherchées auprès du gestionnaire de votre unité, de votre délégation régionale et/ou à l'adresse suivante : <http://www.dgdr.cnrs.fr/mpr/pratique/default.htm> ou contacter needs@in2p3.fr.

Indiquez si ce projet bénéficie d'autres sources de financement obtenus ou en cours d'instruction (ANR, projet européen, autres)... et les montants obtenus ou demandés :

Identification des Connaissances Propres

Identification des Connaissances Propres (connaissances antérieures) nécessaires à la réalisation des travaux NEEDS ou à l'exploitation des Résultats

brevets, logiciels, bases de données, savoir-faire oui non

Partenaire	CEA			
Logiciels				
	APOLLO3®			
	AST-PWR			
	Uranie			
Savoir-faire				
	Schéma de calcul réseau/cœur			
	Simulateur REP suivi de charge			
	Plateforme de métamodélisation/optimisation/incertitude			

Résultats susceptibles d'une protection par un droit de Propriété Intellectuelle

catégorie	Résultats attendus
Inventions brevetables	
Logiciels	

→ **Document à remplir et faire signer par le directeur de l'unité de recherche du porteur de projet**

L'envoi de ce document, dûment signé, constitue une condition sine qua non pour l'examen de la présente proposition.

En cas d'acceptation de celle-ci, la ou les tutelles impliquées recevront les informations financières et contractuelles liées à la propriété intellectuelle, à l'exploitation des résultats et à la publication et aux communications convenues entre les parties impliquées dans la convention NEEDS.

Je déclare avoir pris connaissance de la proposition CINEASTE déposée dans le cadre de l'appel à projet du programme NEEDS, sous la responsabilité de Nicolas Thiollière.

Les différentes actions menées dans cadre seront, si la proposition est retenue, soutenues dans le cadre de la politique scientifique du laboratoire.

Nom, qualité, date et signature



Digitally signed by
MARTINEZ Gines
Date: 2022.11.15
18:00:26 +01'00'