

1. Introduction Scientifique

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 éclairer les choix à venir pour les stratégies nationales, les scénarios énergétiques et/ou nucléaires sont particulièrement répandus. L'équipe « Scénarios » du laboratoire Subatech contribue à cet effort à travers une recherche interdisciplinaire visant à produire et analyser des scénarios tout en clarifiant leurs usages afin d'en repousser les limites.

Depuis les années 2010, l'équipe « Scénarios » s'est spécialisée sur la thématique des études systèmes et scénarios électronucléaires associés. Nous avons dans ce cadre cherché à comprendre l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives : ressources, déchets avec un focus particulier sur la gestion du plutonium.

Sur demande du CNRS/IN2P3, nous avons développé en quelques années le code de simulation CLASS (Core Library for Advanced Scenario Simulations), grâce à un effort particulièrement productif de l'équipe « scénario » constituées à cette période d'un EC, de deux postdocs longue durée, d'une doctorante et de stagiaires M2 et M1.

Le code CLASS est l'outil de référence de l'in2p3 pour les études de scénarios nucléaires. Il a été mobilisé pour produire l'évaluation du multirecyclage du plutonium en Réacteurs à Eau Pressurisée qui fut l'objet d'une thèse soutenue à Subatech (Fanny Courtin, 2017). Nous avons développé dans le cadre de cette thèse une méthodologie d'analyse robuste, construite via le formalisme de l'analyse globale de sensibilité. Cette approche a permis de redéfinir le concept de scénario de référence et d'améliorer grandement la pertinence des évaluations des trajectoires.

Le développement du code CLASS a également été soutenu par l'IRSN qui a participé à son financement et qui l'a utilisé dans le cadre de nombreuses études, dont une thèse centrée sur l'évaluation de l'impact du déploiement de réacteurs de type ASTRID sur la gestion dynamique du plutonium (Léa Tillard, 2019).

Sur la période évaluée dans le cadre de ce CS, et dans une optique d'amélioration constante de la confiance dans les sorties de nos outils de simulation du cycle, nous avons piloté le projet international FIT (Functionality Isolation Test). L'objectif de ce projet est de quantifier l'impact d'une fonctionnalité des outils de simulation dynamique du cycle sur les observables de sortie et d'étudier leur propagation dans le cycle. Ce projet est particulièrement stratégique dans la mesure où il intègre une grande partie de la communauté mondiale des physiciens nucléaires qui travaillent sur la simulation du cycle nucléaire. Le premier exercice a conduit à une publication dans la revue internationale Nuclear Engineering and Design (<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111748>). Les travaux relatifs au projet FIT ont été régulièrement présentés dans le cadre des Fuel Cycle international Workshops que nous avons créés et qui sont organisés alternativement en France et aux US depuis 2014. La

dernière édition eut lieu en mode distancié et fut pilotée à Nantes en juillet 2021 (<https://fcw2020.sciencesconf.org>).

Notre activité de recherche est par nature fortement interdisciplinaire et s'appuie depuis 2012 sur une collaboration pérenne entre physiciens et sociologues. Nos recherches ont été motivées par le constat d'une profusion de scénarios énergétiques et nucléaires produits par de multiples institutions. Le rôle et l'impact de ces études sur l'évolution du mix énergétique et électrique restent particulièrement mal définis. Nous avons dans ce cadre apporté de nombreuses réponses à la problématique suivante : « 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 ? ». Le rapport PRISE (en PJ du dossier à destination du CSS) détaille la démarche d'enquête, basée sur l'organisation de « focus-group », l'analyse thématique des données et montre les principaux résultats. Cette collaboration fructueuse entre physiciens et sociologues nous apporte de nombreuses informations qui permettent d'améliorer nos pratiques de scénarisation (construction et analyse de scénarios).

Afin de mieux interagir avec la communauté des économistes et dans une optique de montée en compétence sur la technico-économie de l'énergie, j'ai intégré une formation universitaire à distance en économie (L1/L2 en 2017-2018 et L3 en 2018-2019) à l'université Paris-Sud. J'ai eu ensuite l'occasion de monter une UE d'économie de l'énergie à IMT Atlantique et de coordonner un ouvrage collectif sur l'économie de l'énergie nucléaire (Edition ISTE, 2022) avec Jacques Percebois. Ces nouvelles compétences ont permis de renforcer la collaboration avec les économistes de l'IAE de Nantes avec qui je travaille sur le développement du modèle de dispatch EcoNuke (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113182>), mais aussi sur le développement d'un modèle de croissance à l'équilibre général intégrant un secteur détaillé de l'énergie.

En 2023, l'activité « Scénario » du laboratoire Subatech est rattachée au niveau national à deux structures complémentaires. Nous sommes représentés par le pôle 1 (Systèmes nucléaires et scénarios associés) du GDR SciNEE (Sciences Nucléaires pour l'Énergie et l'Environnement). Nous sommes en parallèle financés par le programme de recherche multipartenaires NEEDS (Nucléaire : énergie, environnement, déchets, société) porté par le CNRS. Nous sommes dans ce dernier cadre coordinateurs de projets interdisciplinaires et interinstituts (CNRS, CEA et IRSN avant 2020) depuis 2014. Nous sommes actuellement coordinateurs du projet CINEASTE (Contributions Interdisciplinaires sur le Nucléaire et l'Énergie : Analyse de Scénarios pour la Transition Énergétique) avec le CEA Cadarache. Ce projet intègre des chercheurs du CNRS/IN2P3 (Subatech, IJC-Lab), du CEA (ITésé, Serma et DER) et du LEMNA.

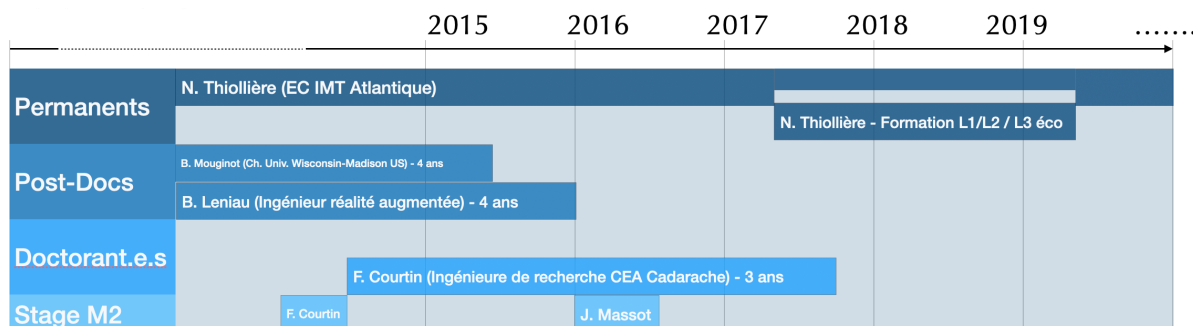
Nous avons obtenu un financement de thèse qui sera co-encadré par Subatech et le CEA/Serma et qui portera sur la modélisation de la flexibilité du nucléaire dans le cadre de la transition énergétique.

À l'échelle locale, le contexte est caractérisé par la vision globale du projet interdisciplinaire portée par Subatech, par les liens étroits construits avec les économistes et sociologues de Nantes ainsi que par l'importance de l'enseignement du nucléaire à l'IMT Atlantique qui assure la viabilité et la cohérence de l'activité à court et moyen terme.

2. L'équipe

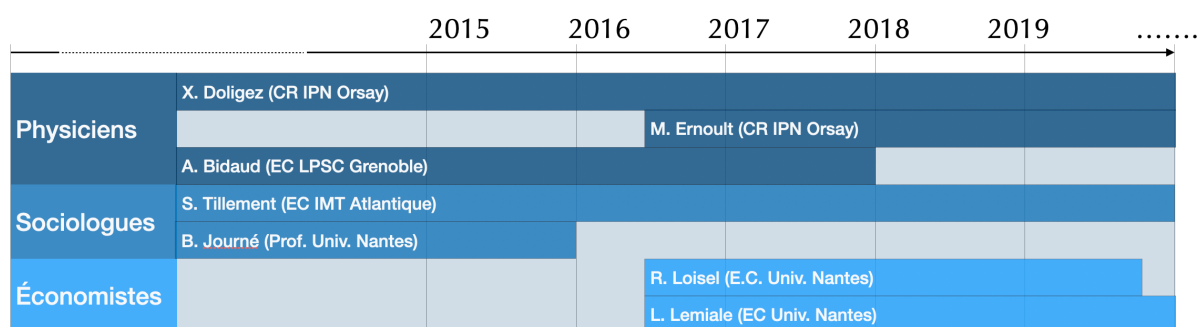
2.1 Personnel (intégré depuis la dernière présentation au CSS ou depuis les derniers 5 ans. Choisir la durée la plus brève). Description qualitative du personnel

L'équipe impliquée dans l'activité « scénario » du laboratoire Subatech est composée en 2023 d'un permanent enseignant-chercheur employé par IMT Atlantique. L'évolution de l'équipe depuis le début de l'activité scénario est représentée sur la figure ci-dessous avec entre parenthèses la situation professionnelle actuelle.



2.2 Collaborations nationales et internationales et responsabilités. Analyse, visibilité et impact de ces collaborations et responsabilités

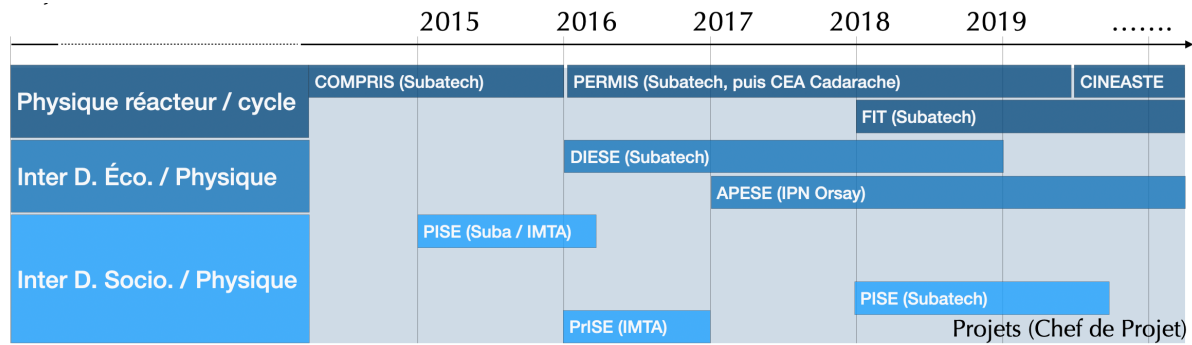
Je collabore au niveau national et de manière très étroite avec une communauté de chercheuses et de chercheurs académiques issue de plusieurs disciplines scientifiques (Physique des réacteurs et du cycle, sociologues des organisations, économistes de l'énergie). La figure ci-dessous explicite les partenariats réguliers dans le temps.



Depuis 2014, j'ai coordonné de nombreux projets financés par les canaux suivants :

- Programme NEEDS du CNRS
- Projet International de Coopération Scientifique (PICS) du CNRS
- Mission Interdisciplinaire du CNRS
- AAP École des Mines de Nantes
- Accords-cadres : IRSN et EDF

La figure ci-dessous présente une frise des principaux projets financés dans lesquels nous avons été impliqués. La mention entre parenthèses précise le laboratoire coordonnateur de projet.



Le projet actuel est le projet CINEASTE que je coordonne depuis 2020 et qui a obtenu une prolongation pour l'année 2023 pour un projet dont les objectifs ont été retravaillés.

Projet CINEASTE

Je coordonne avec le CEA Cadarache le projet CINEASTE (Contributions Interdisciplinaires sur le Nucléaire et l'Énergie : Analyse de Scénarios pour la Transition Énergétique) financé dans le cadre du programme NEEDS du CNRS pour l'année 2023.

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 à partir des données de l'année de référence 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.

Nous avons obtenu un financement de thèse dans le cadre de ce projet. Le sujet de thèse est décrit dans la section 4.3. du document projet CINEASTE fourni en pièce-jointe de ce dossier. Il est prévu un séjour longue durée (environ un an et demi) au CEA/SERMA pour travailler sur la modélisation de la flexibilité des REP-1300 moxés. La deuxième partie de la thèse vise à intégrer les paramètres dynamiques de la flexibilité dans un modèle technico-économique de dispatch et sera réalisée à Nantes. Nous réaliserons alors des évolutions de mix électriques en mettant le focus sur la flexibilité du nucléaire induit par l'augmentation de la part des ENR intermittentes. L'étudiant.e sera rattaché.e au laboratoire Subatech et co-encadré par moi-même, Jean-Michel Do (CEA/Serma) et Lionel Lemiale (IAE Nantes).

L'équipe impliquée dans le projet CINEASTE est détaillée ci-dessous. Le document projet CINEASTE est fourni en pièce-jointe de ce dossier.

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-Chercheur. Sociologie industrielle, sociologie des organisations et du travail	1.5

Projet FIT

J'ai eu l'opportunité de coordonner le projet international FIT (Functionality Isolation Test) initié en 2018 avec des collègues de l'université de Madison-Wisconsin (USA). 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 sera de quantifier l'impact d'une fonctionnalité et d'étudier la propagation de cet impact dans le cycle.

Depuis le début du projet, la communauté FIT se compose des institutions, personnes et codes de simulation dynamique du cycle nucléaire suivant :

- CNRS / IN2P3 (Xavier Doligez, Marc Ernoult et Nicolas Thiollière) - CLASS
- CEA Cadarache (Guillaume Krivtchick, Fanny Courtin) - COSI
- Madison University (Paul Wilson and Baptiste Mouginot) - CYCLUS
- Argonne National Lab (Bo Feng) - DYMOND
- Oak Ridge National Lab (Eva E. Davidson et Jin Whan Bae) - ORION
- Idaho National Lab (Ross Hays) - VISION
- CIEMAT (Aris Villacorta) - Tr_Evol / Evol_code
- TRACTEBEL (Hubert Druenne, Bart Vermeeren) - ANICCA
- Univ. of technology and economics of Budapest (Mate Halasz) - JOSSETTE
- Universidad Católica del Maule (Ivan Merino) - ANICCA

Le principe du projet FIT repose sur le design d'un exercice. Chaque participant résout l'exercice avec une méthodologie libre. Nous comparons alors les différentes conclusions afin de vérifier qu'elles sont indépendantes (ou non) de la méthode et de l'outil utilisé. Mon rôle a consisté à définir avec les partenaires le sujet et les contraintes du premier exercice. J'ai ensuite centralisé les données produites par l'ensemble des partenaires avant de produire l'analyse détaillée des résultats. L'article relatif à l'exercice a été publié dans la revue Nuclear Engineering and Design (<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111748>) et il est joint à ce dossier.

À ce jour, le projet FIT est en « jachère ». J'ai annoncé à la communauté et après la publication du premier article mon souhait de passer la main tant il devient difficile de gérer correctement l'ensemble de mes responsabilités de recherche et d'enseignement. La méthodologie scientifique du projet est parfaitement définie et la communauté est identifiée. Le projet FIT reste d'actualité et sa relance future dépend de la disponibilité d'un.e coordonat.eur.rice.

Workshops Internationaux TwOFCS

Les outils de simulation du cycle du combustible aident à comprendre la physique du cycle du combustible et à mettre en évidence les facteurs qui influencent les inventaires nucléaires. Ils sont également utilisés comme « objets frontières » pour construire des recherches interdisciplinaires en lien avec la sociologie, l'économie, etc. De nombreux outils de simulation du cycle du combustible sont développés par des institutions de R&D et de recherche académiques impliquées dans le nucléaire civil.

Depuis 2015, nous avons initié un effort international visant à mettre en relation les développeurs et utilisateurs de simulateurs du cycle du combustible afin de faciliter le développement de collaborations internationales. Dans ce cadre, des workshops internationaux sont organisés afin de donner l'opportunité aux scientifiques de présenter et

d'échanger sur leurs travaux et de construire des collaborations et des projets aux niveaux national et international.

Les workshops que nous avons organisés sont listés ci-dessous. L'équipe « Scénario » de Subatech a été co-organisateur de tous les workshops réalisés en France et a participé au comité scientifique des workshops US.

- 2016: Institut d'Astronomie, Paris, France
 - o <https://lpsc-indico.in2p3.fr/Indico/event/1357>
- 2017: University of South Carolina, Columbia, USA
 - o <http://twofcs.ergs.sc.edu/>
- 2018: FIPA Jean Monnet, Paris, USA
 - o <https://indico.in2p3.fr/event/16854/>
- 2019: University of Illinois, Urbana-Champaign, USA
 - o <https://arfc.github.io/twofcs19/>
- 2020: Reporté en 2021, car COVID
- 2021: Comité à Nantes pour un workshop en ligne
 - o <https://fcw2020.sciencesconf.org>

Ces workshops ont réuni à chaque édition une cinquantaine de participants de toute nationalité. Ils ont permis l'émergence d'une communauté de chercheuses et chercheurs du cycle, de manière tout à fait complémentaire à l'Expert Group on Advanced Fuel Cycle de la Nuclear Energy Agency.

Nos partenaires historiques US ont été nombreux à changer de poste (Katy Huff nommée à la tête de l'office of Nuclear Energy du département de l'énergie, Bo Feng nommé responsable du programme Gen IV au département de l'énergie, etc.). C'est la raison pour laquelle il n'y a pas eu d'évènement en 2022 organisé par nos partenaires US. Nous prévoyons de relancer l'organisation d'un workshop en France pour l'année 2024.

2.3 Implication dans la formation. Adéquation entre la recherche et la formation.

Inclure la formation par la recherche : stage, doctorat.

En tant qu'enseignant IMT Atlantique, je suis engagé dans de nombreuses activités pédagogiques ou responsabilités d'enseignement et d'encadrement de projet. Mon service d'enseignement au sens large compte environ 200 heures par an. Je précise ci-dessous ces activités pour l'année scolaire 2022 – 2023.

- Co-responsable des parcours nucléaires de 2^e et 3^e année
 - o Gestion d'environ 60 étudiant.e.s
- UE neutronique – Parcours nucléaire IMT Atlantique
 - o Responsabilité de l'UE
 - o Cours, TD et TP
 - o Gestion examens et rattrapage
- Cours d'évolution sous irradiation - Master Nuclear Energy

- UE Économie de l'énergie
 - Responsabilité de l'UE
 - Cours/TD/TP
 - Gestion examens et rattrapage
- UE Économie (Macro/Micro)
 - Cours/TD
- Focus Fission (Interaction neutronique/thermohydraulique)
 - Responsabilité du cours
 - Cours/TD/TP
- Encadrement de projets et de stages
 - Suivi des étudiant.e.s
 - Soutenances et rapports

En complément de ces activités, je vais encadrer cette année deux stagiaires M1 de Nantes Université ainsi qu'une thèse en collaboration avec le CEA/Serma.

Ces deux stages de niveau M1 sont associés à la conception d'un schéma de calcul technico-économique pour l'évolution du mix électrique dans le cadre de la transition énergétique, tel que proposé dans le projet NEEDS CINEASTE.

Le premier stage vise à participer à la réécriture du modèle EcoNuke (modèle technico-économique de dispatch à l'échelle du mix électrique) développé par nos collègues de l'IAE Nantes.

Le deuxième stage vise à caractériser, sur la base des données RTE, la flexibilité du nucléaire dans le parc français pour l'année de référence 2019.

2.4 Thèses soutenues et débutées (intégré depuis la dernière présentation au CSS ou depuis les derniers 5 ans. Choisir la durée la plus brève)

La dernière thèse soutenue dans l'équipe Scénarios de Subatech fut la thèse de Fanny Courtin dont le résumé est rappelé ci-dessous :

Les codes de simulation du cycle du combustible nucléaire sont des outils permettant d'évaluer les stratégies futures du cycle du combustible nucléaire et de comprendre la physique de ce cycle. Dans le contexte d'incertitude entourant l'évolution future du parc nucléaire français, notamment concernant le déploiement de Réacteurs à Neutrons Rapides au sodium (RNR-Na), la problématique de cette thèse est d'étudier des solutions alternatives de gestion du plutonium et des autres noyaux lourds, basées sur les Réacteurs à Eau Pressurisés (REP). Les stratégies étudiées s'appuient sur deux hypothèses. La première suppose un retard important dans le déploiement des RNR- Na, impliquant une stratégie d'attente visant à stabiliser l'inventaire en plutonium. La deuxième hypothèse suppose un abandon de la stratégie de déploiement des RNR. Dans ce cadre, une stratégie d'incinération

du plutonium a été étudiée pour quantifier la capacité de réduction de l'inventaire par les REP. Le code de simulation CLASS, développé par le CNRS/IN2P3 et l'IRSN, est utilisé. Le multirecyclage du plutonium en REP requiert un combustible dédié. Des développements ont été réalisés pour modéliser le combustible étudié, composé de MOX sur un support d'uranium enrichi. Une méthodologie innovante d'évaluation de scénarios nucléaires basée sur l'analyse globale de sensibilité a été appliquée. Cette méthode a permis d'identifier des scénarios de référence pour la stabilisation et la réduction de l'inventaire en plutonium et actinides mineurs. Des simulations du cycle détaillées ont été réalisées afin d'analyser la capacité des REP à gérer le plutonium à l'échelle du cycle.

Fanny Courtin est ingénieure chercheuse au CEA Cadarache en charge des activités de recherche sur les scénarios nucléaires et responsable du code de simulation du cycle COSI.

Dans le cadre du projet CINEASTE, nous avons obtenu un financement pour une thèse co-encadrée CNRS/IN2P3/subatech avec le CEA. Le sujet de thèse vise à produire une analyse de scénarios de production électrique à l'horizon 2050 sur la base de simulations techniques relatives au nucléaire, mais aussi technico-économiques.

RTE a montré dans des scénarios de mix à horizon 2035 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, dont la flexibilité réseau, l'utilisation de smart Grids, le stockage, mais également la manœuvrabilité des réacteurs nucléaires.

Dans ce cadre, il est envisagé d'étendre l'utilisation des combustibles MOX sur certains réacteurs du palier P4-1300 MW. 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 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 limitants, 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 pourraient 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 logicielle 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 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.

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 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.

2.5 Production Scientifique faisant apparaître les items les plus « significatifs » aux yeux de l'équipe (ceux dont on souhaiterait idéalement la lecture par le CS)

Les cinq publications les plus significatives sont mises en évidence par une police en rouge. Elles sont en pièces jointes de ce dossier, à l'exception de l'ouvrage ISTE.

Revues à comité de lecture

1. Nicolas Thiollière, X. Doligez, M. Halasz et al. Impact of fresh fuel loading management in fuel cycle simulators : A functionality isolation test. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 392, 2022.
2. Fanny Courtin, Nicolas Thiollière, Xavier Doligez et al. Assessment of plutonium inventory management in the french nuclear fleet with the fuel cycle simulator CLASS. *Nuclear Engineering and Design*, 2021.
3. Marc Ernoult, Jiali Liang, Xavier Doligez, Nicolas Thiollière, Olivier Meplan, Sandra Bouneau, Sylvain David. Automated selection of nuclides and reactions of interest in a depletion simulation. Precision loss estimation for multiple outputs. *Progress in Nuclear Energy*. Volume 135. 2021.
4. Jiali Liang, Marc Ernoult, Xavier Doligez, Sylvain David, Sandra Bouneau, Nicolas Thiollière, Guillaume Krivtchik, Fanny Courtin, Weifeng Zhou, Stéphanie Tillement. Assessment of strategy robustness under disruption of objective in dynamic fuel cycle studies. *Annals of Nuclear Energy*. Volume 154. 2021.
5. Martin Guillet, Xavier Doligez, Guy Marleau, Maxime Paradis, Marc Ernoult, Nicolas Thiollière. Coupled CLASS and DONJON5 3D full-core calculations and comparison with

- the neural network approach for fuel cycles involving MOX fueled PWRs. *Annals of Nuclear Energy*, Volume 152. 2021.
6. Marc Ernoult, Xavier Doligez, Nicolas Thiollière et al. (2019). Global and flexible models for Sodium-cooled Fast Reactors in fuel cycle simulations. *Annals Nucl. Energy*, 128 :69-76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.12.037>.
 7. Nicolas Thiollière, Fanny Courtin, Xavier Doligez 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.* Volume 4, pages 13, 2018. <https://doi.org/10.1051/epjn/2018009>.
 8. Fanny Courtin, Baptiste Leniau, Nicolas Thiollière et al. Neutronic predictors for PWR fuelled with multi-recycled plutonium and applications with the fuel cycle simulation tool CLASS. *Progress in Nuclear Energy*, Volume 100, 2017, Pages 33-47. ISSN 0149-1970. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.04.018>.
 9. Xavier Doligez, Sandra Bouneau, Sylvain David, Marc Ernoult, Abdoul-Aziz Zakari-Issoufou, Nicolas Thiollière, Adrien Bidaud, Olivier Méplan, Alexis Nuttin, Nicolas Capellan. Fundamentals of reactor physics with a view to the (possible) futures of nuclear energy. *Comptes Rendus Physique*, Volume 18, Issues 7-8, 2017, Pages 372-380, ISSN 1631-0705. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.004>.
 10. A.-A. Zakari-Issoufou, Xavier Doligez, Alice Somaini, Quentin Hoarau, Sylvain David, Sandra Bouneau, Fanny Courtin, Baptiste Leniau, Nicolas Thiollière, Baptiste Mougnot, Adrien Bidaud, Nicolas Capellan, Olivier Meplan, Alexis Nuttin, Americium mono-recycling in PWR : A step towards transmutation, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 102, April 2017, Pages 220-230, ISSN 0306-4549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2016.12.004>.
 11. N. Thiollière, F. Courtin, B. Leniau, B. Mougnot, X. Doligez, A. Bidaud, Prediction of MgO volume fraction in an ADS fresh fuel for the scenario code CLASS, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 85, November 2015, Pages 518-524, ISSN 0149-1970. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.05.011>.
 12. B. Mougnot, B. Leniau, N. Thiollière, A. Bidaud, F. Courtin, X. Doligez, M. Ernoult, MOX fuel enrichment prediction in PWR using polynomial models, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 85, November 2015, Pages 812-819, ISSN 0306-4549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.06.038>.
 13. Baptiste Leniau, Baptiste Mougnot, Nicolas Thiollière, Xavier Doligez, Adrien Bidaud, Fanny Courtin, Marc Ernoult, Sylvain David, A neural network approach for burn-up calculation and its application to the dynamic fuel cycle code CLASS, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 81, July 2015, Pages 125-133, ISSN 0306-4549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.03.035>.
 14. M. Ernoult, S. David, X. Doligez, O. Meplan, B. Leniau, A. Bidaud, A. Nuttin, B. Mougnot, J. Wilson, N. Capellan, N. Thiollière, Advanced plutonium management in PWR, complementarity of thorium and uranium, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 78, 2015, Pages 330-340, ISSN 0149-1970. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.09.012>.
 15. L. Zanini, U. Köster, J.C. David, Y. Tall, M. Andersson, K. Berg, S. Cormon, M. Fallot, Y. Foucher, H. Franberg, F. Gröschel, A. Guertin, T. Kirchner, S. Leray, E. Manfrin, E. Noah, H. Ravn, T. Stora, N. Thiollière, M. Wohlmuther, Measurement of Volatile Radionuclides Production and Release Yields followed by a Post-Irradiation Analysis of

- a Pb/Bi Filled Ta Target at ISOLDE, Nuclear Data Sheets, Volume 119, 2014, Pages 292-295, ISSN 0090-3752. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.08.080>.
16. Nicolas Thiollière, Luca Zanini, Jean-Christophe David, Jost Eikenberg, Arnaud Guertin, Alexander Yu. Konobeyev, Sébastien Lemaire, and Stefano Panebianco. Gas Production in the MEGAPIE Spallation Target. Nuclear Science and Engineering : 169, 178-187, 2011.
 17. L. Zanini, S. Dementjev, F. Gröschel, W. Leung, R. Milenkovic, K. Thomsen, W. Wagner, M. Wohlmuther, Xu Cheng, A. Class, A. Konobeyev, P. Agostini, P. Meloni, J.C. David, A. Letourneau, S. Leray, S. Panebianco, L. Cachon, C. Latgé, P. Roubin, A. Guertin, N. Thiollière, M. Dierckx. Experience from the post-test analysis of MEGAPIE. Journal of Nuclear Materials, Elsevier, 2011, 415, pp.367-377. [10.1016/j.jnucmat.2011.04.037](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.04.037).
 18. S.P. Chabod, J.-Ch. David, D. Ene, D. Ridikas, N. Thiollière. In-target radioactive nu- clei production rates with EURISOL single-stage target configuration. European Physical Journal A, EDP Sciences, 2010, 45, pp.131-145. [10.1140/epja/i2010-10989-7](https://doi.org/10.1140/epja/i2010-10989-7)
 19. Stefano Panebianco, Klara Berg, Jean-Christophe David, Mohamed Eid, Uwe Filges, Friedrich Gröschel, Arnaud Guertin, Alexander Yu Konobeyev, Christian Latgé, Sébastien Lemaire, Sylvie Leray, Alain Letourneau, Markus LÃ14thy, Franco Michel-Sendis, Selene Scazzi, Gediminas Stankunas, Nicolas Thiollière, Leonhard Tobler, Luca Zanini. Neutro- nic characterization of the MEGAPIE target, Annals of Nuclear Energy, Volume 36, Issue 3, 2009, Pages 350-354, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.12.013>.
 20. S. Boyer, D. Dassié, J.N. Wilson, M. Aïche, G. Barreau, S. Czajkowski, C. Grosjean, A. Guiral, B. Haas, B. Osmanov, G. Aerts, E. Berthoumieux, F. Gunsing, Ch. Theisen, N. Thiollière, L. Perrot, Determination of the $^{233}\text{Pa}(n,\gamma)^{233}\text{Pa}$ capture cross section up to neutron energies of 1 MeV using the transfer reaction $^{232}\text{Th}(^3\text{He},p)^{233}\text{Pa}^*$, Nuclear Physics A, Volume 775, Issues 3-4, 2006, Pages 175-187, ISSN 0375-9474, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2006.06.013>.

Ouvrages et chapitres d'ouvrage

1. S. Tillement et N. Thiollière. La recherche interdisciplinaire sur les scénarios électronucléaires, dans "L'interdisciplinarité - Voyages au-delà des disciplines". Dirigé par S. Blanc, M. Bouzeghoub, M. Knoop. CNRS Edition, Paris. 2023.
2. Collectif dirigé par Jacques Percebois et N. Thiollière. Économie de l'énergie nucléaire - tome 1. Analyse économique du cycle électronucléaire. ISTE Editions, 2022.
3. Collectif dirigé par Jacques Percebois et N. Thiollière. Économie de l'énergie nucléaire - tome 2. Enjeux dans la transition énergétique. ISTE Editions, 2022.
4. S. Bretesché, B. Grambow, P. Chardon, D. Gay, R. Guillaumont, B. Journé, J. Levèque, B. Mougnot, M. Ponnet, N. Thiollière, S. Tillement. Le Nucléaire au prisme du temps. Presses des Mines, 2014.
5. Alexander Aerts, Heike Glasbrenner, Stephan Heinitz, Mikael Jolkhonen, Yuji Kurata, Jorg Neuhausen, Toru Obara, Nicolas Thiollière, Luca Zanini. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, Chapter 5 : Properties of irradiated LBE and Pb. 2015 Edition. OECD / NEA.

Autres publications scientifiques

1. N. Thiolliere, Baptiste Mouginot, Jean-Baptiste Clavel, Arnaud Cadiou, Fanny Courtin, Amélie Pector. A High power ADS concept. Proceedings of Technology and Components of Accelerator-Driven Systems, Second International Workshop. Nantes, France. 2013.
2. Baptiste Mouginot, Nicolas Thiollière. CLASS : Core Library for Advanced Scenario Simulations. Proceedings of Technology and Components of Accelerator-Driven Systems, Second International Workshop. Nantes, France. 2013.
3. J.L. Biarrotte, A. Billebaud, S. David, A. Guertin, A. Mueller, N. Thiollière. Potentiel d'incinération des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur et validation expérimentale du concept. Rapport CNRS. Bilan des recherches conduites sur la séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue et sur le développement de réacteurs nucléaires de nouvelle génération. Tome 2 Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Décembre 2012.
4. A. Guertin, N. Thiollière, A. Cadiou, J.M. Buhour, O. Batrak, M. Dierckx, J. Heyse, K. Rosseel, P. Schuurmans, K. Van Tichelen, R. Stieglitz, A. Batta, A. Class, F. Roelofs, H. Jeanmart, V. Moreau. XT-ADS windowless spallation target design and corresponding R&D topics. Proceedings of the First International Workshop on Technology and Components for Accelerator-driven Systems. Karlsruhe (Germany) 2010.
5. J.-C. David, S. Chabod, D. Doré, D. Ene, B. Rapp, D. Ridikas, N. Thiollière, In-Target Yields for Radioactive Ion Beam (RIB) Production with EURISOL, Proceedings of AccApp09, 2009.
6. L. Zanini, H.U. Aebbersold, K. Berg, J. Eikenberg, U. Filges, F. Gröschel, M. LÃ14thy, M. RÃ14thi, S. Scazzi, L. Tobler, W. Wagner, B. Wernli, S. Panebianco, J.-C. David, D. Doré, S. Lemaire, S. Leray, A. Letourneau, F. Michel-sandis, A. Prevost, D. Ridikas, G. Stankunas, J.-C. Toussaint, M. Eid, C. Latgé, A. Yu. Konobeyev, U. Fischer, N. Thiollière, A. Guertin, T. Buchillier, C. Bailat. Neutronic and Nuclear Post-Test Analysis of MEGAPIE. PSI Bericht Nr. 08-04, ISSN 1019-0643, 2009.
7. Nicolas Thiollière, Jean-Christophe David, Mohamed Eid, Alexander Yu. Konobeyev, Jost Eikenberg, Ulrich Fischer, Friedrich Gröschel, Arnaud Guertin, Christian Latgé, Sébastien Lemaire, Sylvie Leray, Alain Letourneau, Franco Michel-Sendis, Kenji Nishiha-rah, Stefano Panebianco, Gediminas Stankunas, Werner Wagner, Beat Wernli, Luca Zanini. Gas production and activation calculation in MEGAPIE. Proceedings of the International Conference on the Physics of Reactors Nuclear Power : A Sustainable Resource. Interlaken (Switzerland) 2008.
8. B. Rapp, J.C. David, V. Blideanu, D. Doré, D. Ridikas, N. Thiollière. Benchmarking of the modelling tools within the EURISOL DS project. Proceedings of SATIF8 - Republic of Korea, 2006.

Conférences, colloques, séminaires et autres

1. Nicolas Thiolliere et al. Le projet CINEASTE. Colloque NEEDS, 2022. Paris, France.
2. Nicolas Thiolliere et al. Les études de scénarios nucléaires et énergétiques. Perspectives in2p3, GT11 (Énergie nucléaire et environnement), 2020. Strasbourg, France.
3. Nicolas Thiolliere. From neutronics to nuclear scenarios. Joliot-Curie School, 2019. Olé-

4. ron, France.
5. Nicolas Thiolliere, et al. FIT (Functionality Isolation Test) Project, first results. 4th
6. technical workshop on fuel cycle simulation, Jul 2019, Urbana Champaign, USA.
7. Nicolas Thiollière. Les études de scénarios nucléaires à l'in2p3. GDR SciNEE, Janvier
8. 2019. Lyon, France.
9. N. Thiollière et al. Fuel cycle simulations at CNRS/IN2P3. Seminar at Budapest Univer-
10. sity of Technology and Economics. November 2018. Budapest, Hungary.
11. N. Thiollière et al. A new kind of fuel cycle benchmark : FIT Benchmark. 3rd technical
12. workshop on fuel cycle simulation, Jul 2018, Paris, France. 2018.
13. Rodica Loisel, Lionel Lemiale, Nicolas Thiolliere, Xavier Doligez, Silvana Mima, et al.
14. Nuclear and renewables in deregulated markets. Nuclear fuel cycle cost estimates with cross-disciplinary modelling. 3rd technical workshop on fuel cycle simulation, Jul 2018, Paris, France. 2018.
15. A.-A. Zakari-Issoufou, X. Doligez, A. Somaini, M. Ernoult, S. David, S. Bouneau, F. Courtin, B. Leniau, Nicolas Thiolliere, B. Mougnot, A. Bidaud. Americium Early Transmutation in Thermal Reactors : An Option to a Better Nuclear Spent Fuel Management. In-ternational Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP2017), Apr 2017, Kyoto, Japan. pp.17388.
16. Nicolas Thiolliere, Fanny Courtin et al. Study of plutonium reprocessing in PWR with the CLASS tool. Technical Workshop on Fuel Cycle Simulation. Columbia, USA, 2017.
17. Nicolas Thiolliere, Fanny Courtin et al. Study of plutonium reprocessing in PWR with the CLASS tool. Technical Workshop on Fuel Cycle Simulation. Columbia, USA, 2017.
18. F. Casella, A. Bidaud, N. Thiollière. Economic Module Development for the Fuel Cycle Simulation Tool CLASS. ANS Annual Meeting, Jun 2017, San Francisco, United States. Trans. of American Nuclear Society 116, pp.187-189 2017.
19. N. Thiollière et al. Fuel cycle simulations : Limitations and Sensitivity Analysis. Seminar at University of Madison Wisconsin. January 2017. Madison, USA.
20. F. Courtin, B. Leniau, B. Mougnot, N. Thiollière, X. Doligez, A. Bidaud. PWR MOX Physics Models For The Dynamic Fuel Cycle Simulation Tool CLASS, In Physor 2016. Sun Valley, Idaho , USA, 2016.
21. B. Leniau, F. Courtin, B. Mougnot, N. Thiolliere, X. Doligez, A. Bidaud. Generation of SFR Physics Models for the Nuclear Fuel Cycle Code Class . In Physor 2016. Sun Valley, Idaho , USA, 2016.
22. Baptiste Leniau, Baptiste Mougnot, Nicolas Thiollière, Xavier Doligez, Adrien Bidaud, Fanny Courtin, and Marc Ernoult. Mean Cross Section Prediction in PWR-MOX Using Neural Network. In Proceedings of Global 2015, Paris, France, 2015.
23. N. Thiollière, F. Courtin, B. Leniau, B. Mougnot, X. Doligez, A. Bidaud. Mean MgO effect on an ADS neutronic parameters. In Proceedings of Global 2015, Paris, France, 2015.
24. Stéphanie Tillement, Stéphane Guyard, Nicolas Thiolliere, Benoit Journée. Participating to electronuclear scenarios development : a process supporting decision or the construction of a new social world ? Participating in Innovation, Innovating in Participation 3-4 December
25. 2015, Paris
26. Nicolas Thiollière et al. ADS de puissance dans les scénarios nucléaires. Audition CNE,
27. session "Amont R&D". Avril 2014.
28. B. Mougnot, B. Leniau, N. Thiollière, M. Ernoult, S. David, X. Doligez, A. Bidaud, O.

29. Meplan, R. Montesanto, G. Bellot, JB Clavel, I. Duhamel, E. Letang , J. Miss. CORE LIBRARY FOR ADVANCED SCENARIO SIMULATION, C. L. A. S. S. : PRINCIPLE & APPLICATION. International Conference on the Physics of Reactors Nuclear Power : A Sustainable Resource. Kyoto (Japan) 2014.
30. N. Thiolliere, Baptiste Mougnot, Jean-Baptiste Clavel, Arnaud Cadiou, Fanny Courtin, Amélie Pector. A High power ADS concept. Technology and Components of Accelerator- Driven Systems, Second International Workshop. Nantes, France. 2013.
31. Baptiste Mougnot, Nicolas Thiollière. CLASS : Core Library for Advanced Scenario Simulations. Technology and Components of Accelerator-Driven Systems, Second Interna- tional Workshop. Nantes, France. 2013.
32. Stéphanie Tillement, Benoit Journé, Nicolas Thiollière et Baptiste Mougnot. Le temps cyclique : Réacteurs du futur. Quels scénarios pour quelles décisions? Colloque Temps, Technique, Uranium. Nantes, 2013.
33. Jean-Baptiste Clavel, Nicolas Thiolliere, Baptiste Mougnot. The MUST ADS Concept. World Academy of Science, Engineering and Technology 63 2012
34. B. Mougnot, J.B. Clavel and N Thiolliere. CLASS, a new tool for nuclear scenarios : Description & First Application. World Academy of Science, Engineering and Technology 63 2012.
35. N. Thiollière, L. Zanini, J.C. David, J. Eikenberg, A. Guertin, A.Y. Konobeyev, S. Le- maire, S. Panebianco. Gas production in the MEGAPIE spallation target. International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications - ANIMMA . Ghent, Belgium. 6-9 June, 2011.
36. Nicolas Thiollière, Jean-Christophe David, Mohamed Eid, Alexander Yu. Konobeyev, Jost Eikenberged, Ulrich Fischer, Friedrich Gröschel, Arnaud Guertin, Christian Latgé, Sé- bastien Lemaireg, Sylvie Leray, Alain Letourneau, Franco Michel-Sendis, Kenji Nishiharah, Stefano Panebianco, Gediminas Stankunas, Werner Wagner, Beat Wernli, Luca Zanini. Gas production and activation calculation in MEGAPIE. International Conference on the Phy- sics of Reactors Nuclear Power : A Sustainable Resource. Interlaken (Switzerland) 2008.
37. Nicolas Thiollière, Jean-Christophe David, Mohamed Eid, Alexander Yu. Konobeyev, Jost Eikenberged, Ulrich Fischer, Friedrich Gröschel, Arnaud Guertin, Christian Latgé, Sé- bastien Lemaireg, Sylvie Leray, Alain Letourneau, Franco Michel-Sendis, Kenji Nishiharah, Stefano Panebianco, Gediminas Stankunas, Werner Wagner, Beat Wernli, Luca Zanini. Gas production and activation calculation in MEGAPIE. MEGAPIE Technical Review Meeting. Aix en Provence, 2008.

Communications et publications généralistes

[Toutes les interventions ne sont pas référencés ici]

1. Stéphanie Tillement, Nicolas Thiollière. Énergie nucléaire et société. Conférence. Lycée Agricole Le Fresnes, Angers. 2022.
2. Stéphanie Tillement, Nicolas Thiollière. Nucléaire : une multiplicité de scénarios pour tenter d'imaginer le futur de la filière. The conversation. Avril 2019.
3. Nicolas Thiollière. Stratégie MOx : quelle incidence sur le parc nucléaire français ? L'IM- Tech, L'actualité scientifique et technologique de l'IMT. Janvier 2019.

4. Nicolas Thiollière. Quelles énergies pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Saint Dominique Nantes, 2017.
5. Nicolas Thiollière. Quelles énergies pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Atlantique Luçon, 2016.
6. Nicolas Thiollière. Quelles énergies pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Saint Dominique Nantes, 2016.
7. Nicolas Thiollière. Quelles énergies pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Saint Dominique Nantes, 2015.
8. Patrick Chardon, Olivier Ravel, Nicolas Thiollière. Vers le démantèlement nucléaire. Emission de radio Le Labo des Savoirs. Diffusée le mercredi 23 avril 2014. Lien Site France Culture
9. Nicolas Thiollière. Quelles sources d'énergie pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Saint Dominique Nantes, 2014.
10. Nicolas Thiollière. Peut-on sortir du nucléaire ? Conférence NEPAL du CNRS. Université du Temps Libre de Mayenne, 2014.
11. Nicolas Thiollière. Quelles sources d'énergie pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Saint Dominique Nantes, 2013.
12. Nicolas Thiollière. Quelles sources d'énergie pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Saint Jean-Baptiste de Lasalle Nantes, 2013.
13. Nicolas Thiollière. Quelles sources d'énergie pour demain ? Conférence NEPAL du CNRS. Lycée Saint Dominique Nantes, 2012.
14. N. Thiollière, A. Guertin. Un nucléaire plus propre. Têtes chercheuses, numéro 17, 2011.

2.6 Vie de l'équipe et animation, collaborations internes à l'équipe (expliquez pourquoi vous formez une équipe et n'êtes pas simplement un ensemble de chercheurs)

Historiquement, l'activité scénarios nucléaires s'insère à l'IN2P3 dans un environnement plus large que constituent les recherches en lien avec l'énergie nucléaire. De manière un peu plus précise, nous sommes liés aux recherches portant sur les systèmes nucléaires et scénarios associés. Cela intègre les études de réacteurs innovants, de scénarios associés, mais aussi le développement des outils de calculs permettant de réaliser ces études. Nous sommes enfin liés à la physique nucléaire expérimentale dont les mesures permettent d'améliorer la connaissance des données nucléaires de base utilisée dans les modèles et in fine leur fiabilité. Nous sommes donc naturellement intégrés au Pôle 1 du GDR SciNÉE :

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/poles>

En tant qu'enseignant-chercheur, unique permanent de l'activité scénario au sein du laboratoire Subatech, je développe la question de la vie de l'équipe à travers plusieurs dimensions.

Dimension locale - Subatech

Sur une perspective purement thématique, je n'ai que peu de relais au sein du laboratoire Subatech. Mon virage thématique de ces dernières années, fortement axé sur les aspects interdisciplinaires de nos études et particulièrement sur l'analyse technico-économique du mix électrique et du parc nucléaire, contribue encore à m'isoler un peu plus.

Je suis actuellement rattaché administrativement à la Direction du laboratoire. L'activité scénario peut devenir une équipe à proprement parler, mais implique un renfort permanent. Le profil de poste doit absolument être complémentaire à mon profil de recherche. C'est-à-dire que le/la candidat.e devra être recruté.e sur la base d'une expertise en système et scénarios électronucléaires.

Du point de vue relationnel, hors thématique de recherche, je suis membre très actif du conseil de laboratoire depuis plus de 5 ans. J'ai pu dans ce cadre mener de nombreuses actions à destination des doctorant.e.s du laboratoire, mais également des ITAs (Ingénieurs, Techniciens et Administratifs), par exemple dans le cadre d'une réflexion globale menée en 2021 sur le pointage des agents.

Dimension locale – IMT Atlantique

J'ai au sein de IMT Atlantique des relations très riches avec mes collègues enseignants, responsables de parcours. Je mène régulièrement des réflexions avec mes collègues des parcours énergétiques, car nous réalisons de plus en plus qu'il existe de fortes synergies entre les formations liées à l'énergie nucléaire et celles liées aux ENRs. De plus en plus, certains élèves ingénieurs souhaitent avoir une formation transversale et cela implique de mieux coordonner nos parcours respectifs.

Sur le plan de la recherche, mais aussi de l'enseignement, je travaille régulièrement avec des collègues issues des SHS (Sciences Humaines et Sociales). La collaboration avec le département SSG (Sciences Sociales et de Gestion) est très fructueuse depuis de nombreuses années. J'interagis également avec le département LUSI (Logique des usages, sciences sociales et sciences de l'information) dans le cadre de ma participation à l'UE économie (micro et macro) à destination des élèves de 1^{re} année.

Dimension locale - Nantes

Mes liens de recherche à l'échelle nantaise sont essentiellement centrés sur la collaboration avec l'institut d'économie et de management (IAE) de Nantes Université. J'ai co-encadré avec l'IAE de Nantes de nombreux stages de niveau M1 et M2 centrés sur les aspects technico-économiques des mix électriques.

Dimension nationale

Je suis fortement impliqué à l'échelle nationale dans la coordination et l'animation d'une équipe de chercheuses et de chercheurs à forte composante interdisciplinaire. Cette dimension se matérialise par la collaboration CINEASTE décrite en section 3 de ce document.

[2.7 stratégie scientifique à moyen terme et ressources associées](#)

La stratégie scientifique à moyen terme de l'équipe Scénario du laboratoire Subatech s'appuie sur la collaboration et le projet de recherche CINEASTE, qui sera décrit dans la section suivante.

La déclinaison du projet CINEASTE à l'échelle du laboratoire implique la création d'un poste d'enseignant-chercheur rattaché à l'équipe scénario, laquelle pourra alors être visible et représentée dans l'organigramme du laboratoire.

Les activités de l'équipe en devenir s'articuleront autour de deux pôles :

1. Le pôle « technico-économie des mix électriques »
2. Le pôle « physique des réacteurs et du cycle »

Le premier pôle se situe à l'interface entre la physique des réacteurs et du cycle et les Sciences Humaines et Sociales. L'objectif de ce pôle est de monter en compétence sur les problématiques technico-économiques mix électrique à l'horizon 2050, avec un focus spécifique sur l'interaction entre le nucléaire et les ENRs intermittentes. Mes efforts des 5 dernières années se focalisent en grande partie sur le développement de ce pôle.

Le deuxième pôle, pour lequel un recrutement EC IMT Atlantique est nécessaire et défendu par la direction du laboratoire, s'ancre fortement dans les thématiques historiques de l'IN2P3 tout en garantissant un haut niveau d'expertise mobilisable dans le cadre de la formation IMT Atlantique. L'objectif de ce pôle est de construire et d'étudier des trajectoires robustes et résilientes pour le parc électronucléaire français. Ce pôle s'appuie sur l'utilisation et le développement du code de simulation dynamique du cycle CLASS conçu par Subatech. Les études systèmes associées visent à produire des modèles de réacteurs et/ou de stratégie de combustible innovants. La personne recrutée aura également la charge de relancer la collaboration internationale FIT afin de pérenniser l'effort de coordination d'une communauté internationale sur les scénarios nucléaires.

Les deux pôles communiquent à travers l'interaction forte entre le parc nucléaire et le mix électrique. À l'équilibre, deux thèses, l'une axée sur les études systèmes et scénario, l'autre plus axée interdisciplinaire en lien avec l'IAE de Nantes, sont mobilisées dans l'équipe.

3. Les projets/activités en cours et projets à venir

3.1. Projet CINEASTE

Cette section vise à décrire le projet CINEASTE dont les contours ont été redessinés à l'occasion de l'AAP NEEDS 2022 pour l'année 2023. Le texte qui suit est issu du document projet NEEDS / CINEASTE que j'ai rédigé avec ma collègue du CEA Cadarache co-porteuse du projet.

3.1.1 Objectifs scientifiques

Historiquement, 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). Les résultats de cette collaboration ont permis de

montrer 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 de plusieurs articles dans des revues à comité de lecture produits par notre collaboration [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.

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 perspectives 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 interinstituts.

3.1.2 Contexte national

Le projet CINEASTE est multi-institut et se compose des équipes et outils de modélisation 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 Thiollie

=> 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)

3.1.3 Organisation

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 (Voir 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 multirecyclage 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 pourrons 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.

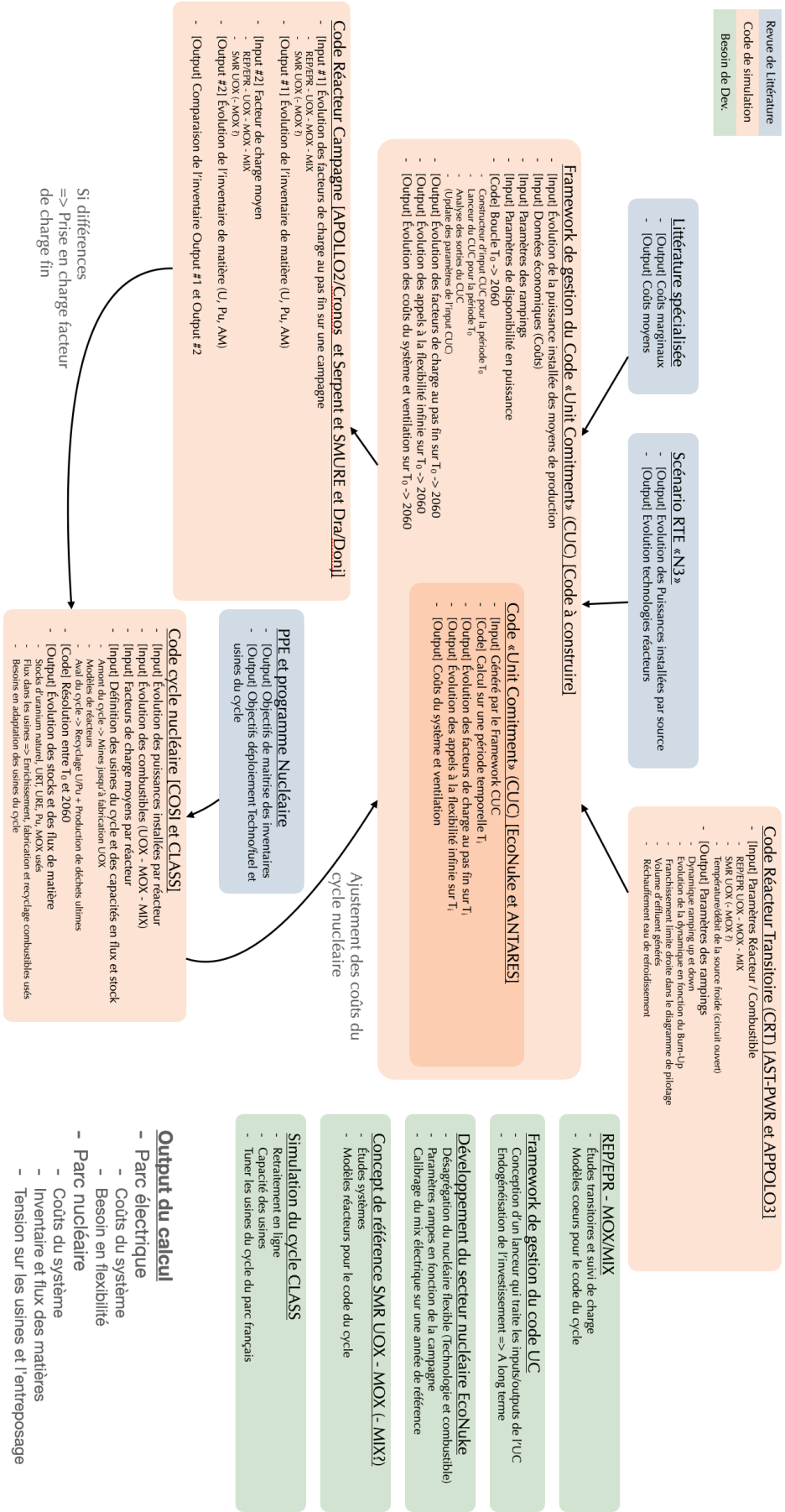


Figure 1. Schéma de calcul de référence sans disruption

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 confrontées 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) assigné 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 ?
 - 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
 - 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 ?
 - 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)
 - 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) ?
 - 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 ?
 - a. Quelles échelles de temps sont-elles pertinentes pour penser la résilience ?
 - b. Quels conflits de temporalités peuvent affecter la qualité des scénarios produits et les stratégies / politiques liées (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. Analyse SWOT

L'analyse SWOT de la dernière évaluation HCERES reste pertinente à ce jour. Elle est reproduite telle qu'elle avait été présentée en 2020.

Strength		Weakness		
Transversal Skills <ul style="list-style-type: none"> • Reactor and Cycle physics • Economy of energy • Sensitivity analysis 		No HDR		Internal factors
Leaderships <ul style="list-style-type: none"> • Interdisciplinary • International 		Small local team		
Link with Education <ul style="list-style-type: none"> • IMT Atlantique (Eco, Reactor) • Industrial Projects 		Fragmented national team		
Opportunities		Threats		
Societal interest <ul style="list-style-type: none"> • Energy Transition • Needs for multi-criteria analysis 		Interdisciplinarity <ul style="list-style-type: none"> • Low Enhancement • Human resources • Publications 		External factors
Nuclear park transition <ul style="list-style-type: none"> • Needs for academic experts 		Stable but uncertain budget		
Positive		Negative		

5. Références

- [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.