



IN2P3

Institut national de **physique nucléaire**
et de **physique des particules**



Les études de scénarios nucléaires et énergétiques

Prospectives in2p3

GT11 – Energie nucléaire et environnement

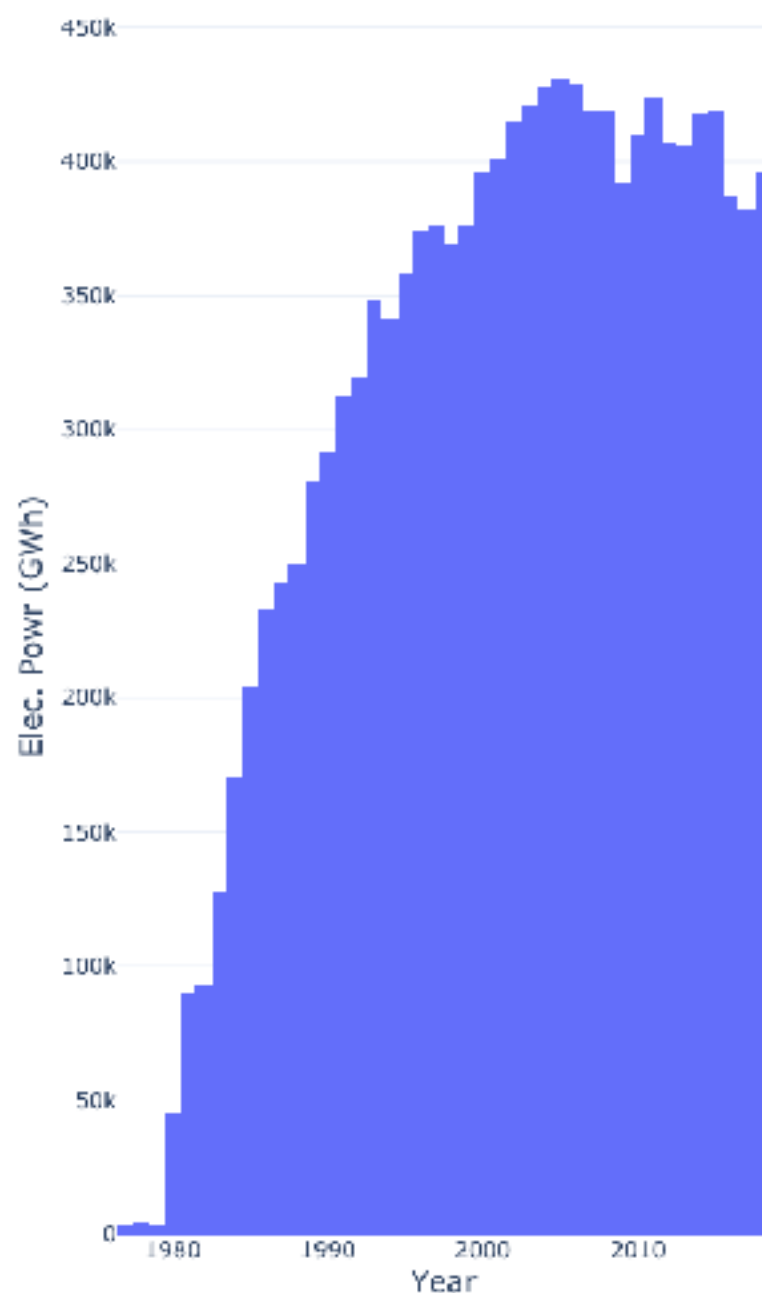
IPN d'Orsay / IJC Lab : S. Bouneau, S. David, X. Doligez, M. Ernoult

LPSC Grenoble : A. Bidaud

Subatech Nantes : N. Thiollière



- La France est engagée dans une transition énergétique via notamment la loi Énergie Climat de novembre 2019:
 - ▶ Neutralité carbone en 2050
 - ▶ 40% de réduction de la consommation de fossile en 2030 / 1990
 - ▶ Réduire la part du nucléaire dans le mix électrique à 50% en 2035



- Evolution des réacteurs
 - ▶ Évolution de la puissance installée,
 - ▶ Évolution des paramètres techniques (LF, BU, etc.)
 - ▶ Déploiement de l'EPR? Des RNR? Autres technologies?
- Gestion des combustibles
 - ▶ Recyclage du plutonium (quel statut futur: valorisable ou déchets?)
 - ▶ Uranium de retraitement
 - ▶ Gestion des déchets nucléaires (PF et AM)
- Disponibilité des ressources
 - ▶ Consommation d'uranium naturel
- Production et gestion des déchets nucléaires
 - ▶ Production et composition des PF et des AM
 - ▶ Politique de gestion des déchets nucléaires
- Démantèlement des installations

- Problématique #1 - Scénarios nucléaires (Physique des réacteurs et du cycle)
 - Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets et plutonium) ?
- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires
 - Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
 - Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
 - Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives
- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios
 - Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
 - Impact des fonctionnalités au coeur des simulateurs du cycle nucléaire sur les sorties
- Problématique #2 - Scénarios de transition énergétique (Economie et Physique)
 - Quel est l'impact d'une transition énergétique sur l'économie?
- Axe de recherche : Développement d'un modèle de production multi-sectoriel
 - Développement d'un outil de modélisation du secteur de l'énergie du point de vue « physique »
 - Couplage du modèle physique avec un modèle économique global
- Problématique #3 - Interaction intermittence / nucléaire (Economie et Physique)
 - Quelles sont les conséquences de l'augmentation du suivi de charge nucléaire induit par l'augmentation du renouvelable intermittent sur l'exploitation des centrales nucléaires?
- Problématique #4 - Rôles et usages des scénarios (Sociologie et Physique)
 - Dans quelle mesure le « scénario » est-il un outil adapté pour répondre à ces questions?

- Problématique #1 - Scénarios nucléaires (Physique des réacteurs et du cycle)
 - Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets et plutonium) ?
- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires
 - Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
 - Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
 - Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives
- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios
 - Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
 - Impact des fonctionnalités au coeur des simulateur du cycle nucléaire sur les sorties
- Problématique #2 - Scénarios de transition énergétique (Economie et Physique)
 - Quel est l'impact d'une transition énergétique sur l'économie?
- Axe de recherche : Développement d'un modèle de production multi-sectoriel
 - Développement d'un outil de modélisation du secteur de l'énergie du point de vue « physique »
 - Couplage du modèle physique avec un modèle économique global
- Problématique #3 - Interaction intermittence / nucléaire (Economie et Physique)
 - Quelles sont les conséquences de l'augmentation du suivi de charge nucléaire induit par l'augmentation du renouvelable intermittent sur l'exploitation des centrales nucléaires?
- Problématique #4 - Rôles et usages des scénarios (Sociologie et Physique)
 - Dans quelle mesure le « scénario » est-il un outil adapté pour répondre à ces questions?

- Problématique #1
 - ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets et plutonium) ?
- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires
 - ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
 - ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
 - ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Problématique #1

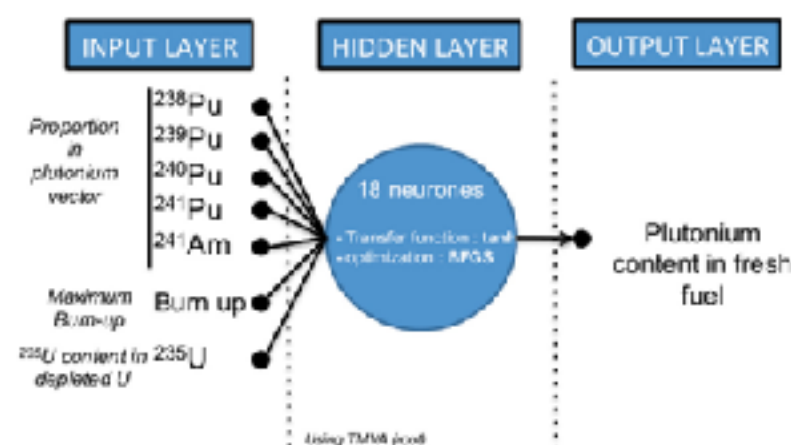
- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets et plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Post-Docs de Baptiste Leniau et Baptiste Mouginot (2011 - 2016) - CNRS

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle nucléaire CLASS
- ▶ Mise en oeuvre et implémentation de réseaux de neurones comme prédicteurs de données neutroniques



- Problématique #1

- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets et plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Post-Docs de Baptiste Leniau et Baptiste Mouginot (2011 - 2016) - CNRS

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle nucléaire CLASS
- ▶ Mise en oeuvre et implémentation de réseaux de neurones comme prédicteurs de données neutroniques

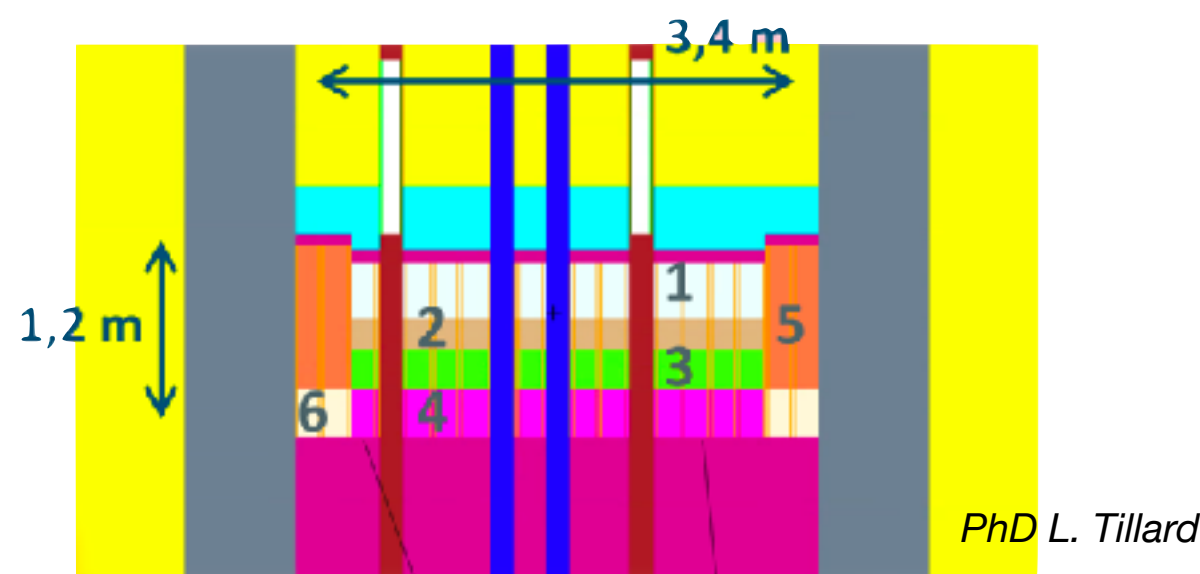
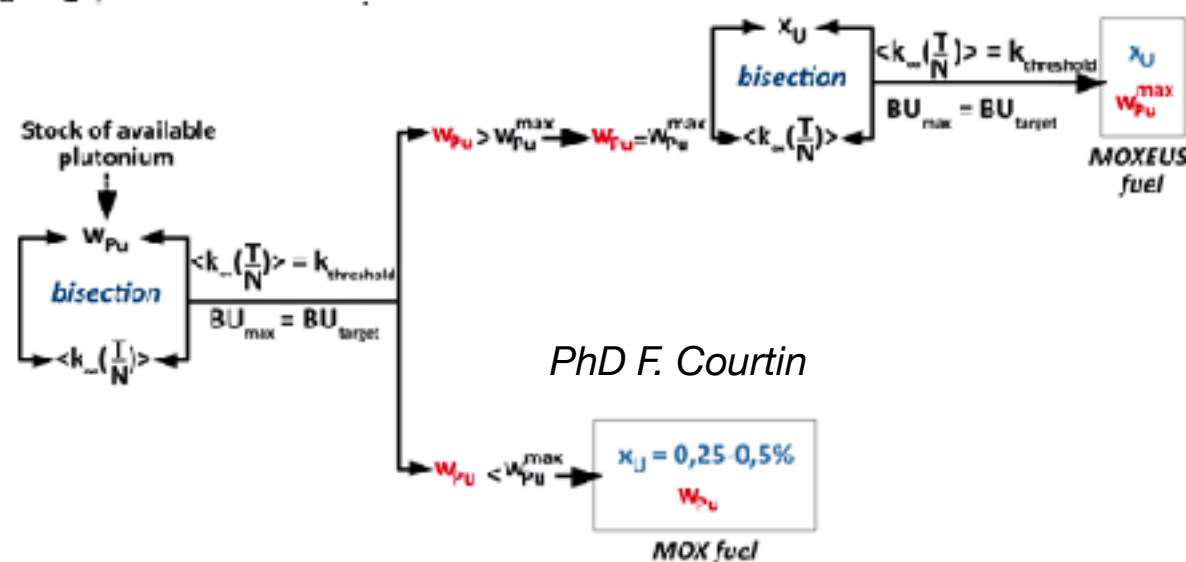
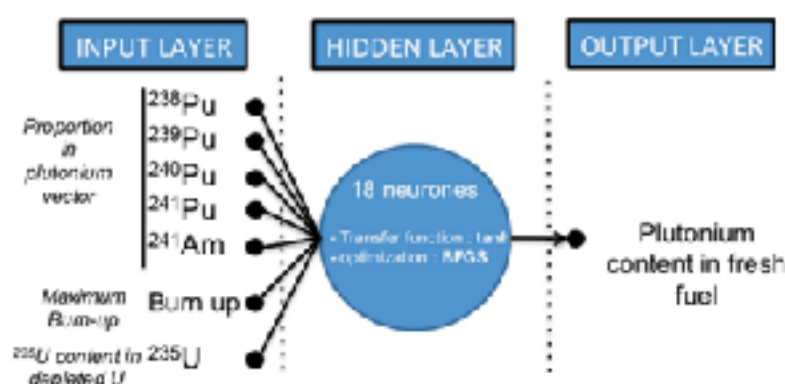


- Thèse de Fanny Courtin (2014 - 2017) - CNRS

- ▶ Implémentation d'un modèle de REP - Multi Pu

- Thèse de Léa Tillard (2016 - 2019) - IRSN / CNRS

- ▶ Développement d'un modèle de RNR type ASTRID
- ▶ Gestion d'un coeur multi-zones



- Problématique #1

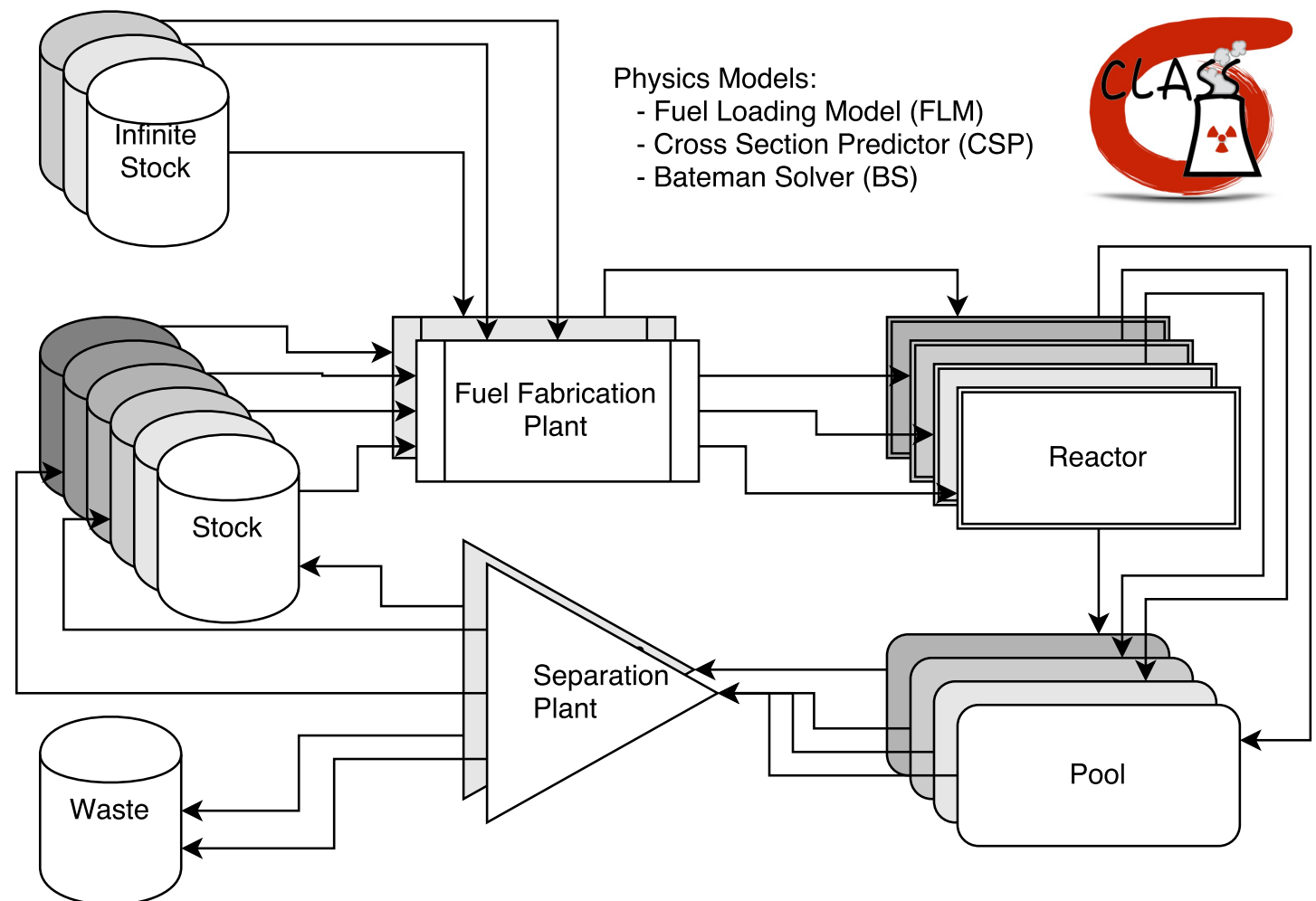
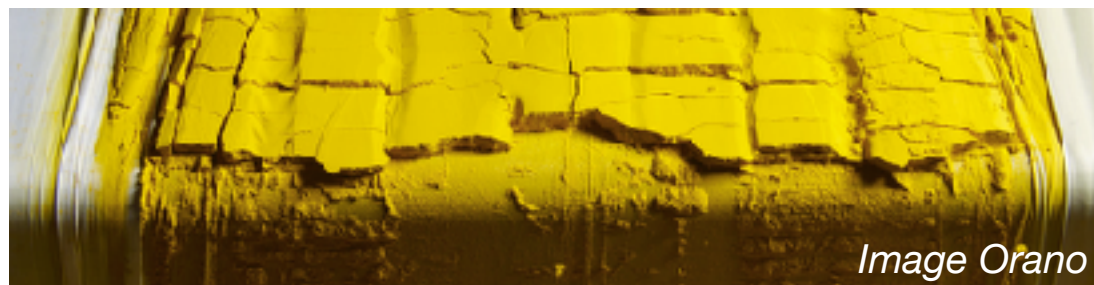
- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets et plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Développement des modèles de mines et d'usine d'enrichissement de l'uranium

- ▶ Estimation plus précise de la consommation (stock et flux) d'uranium naturel
- ▶ Gestion de l'uranium de retraitement enrichi (URE)



- Problématique #1

- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Problématique #1

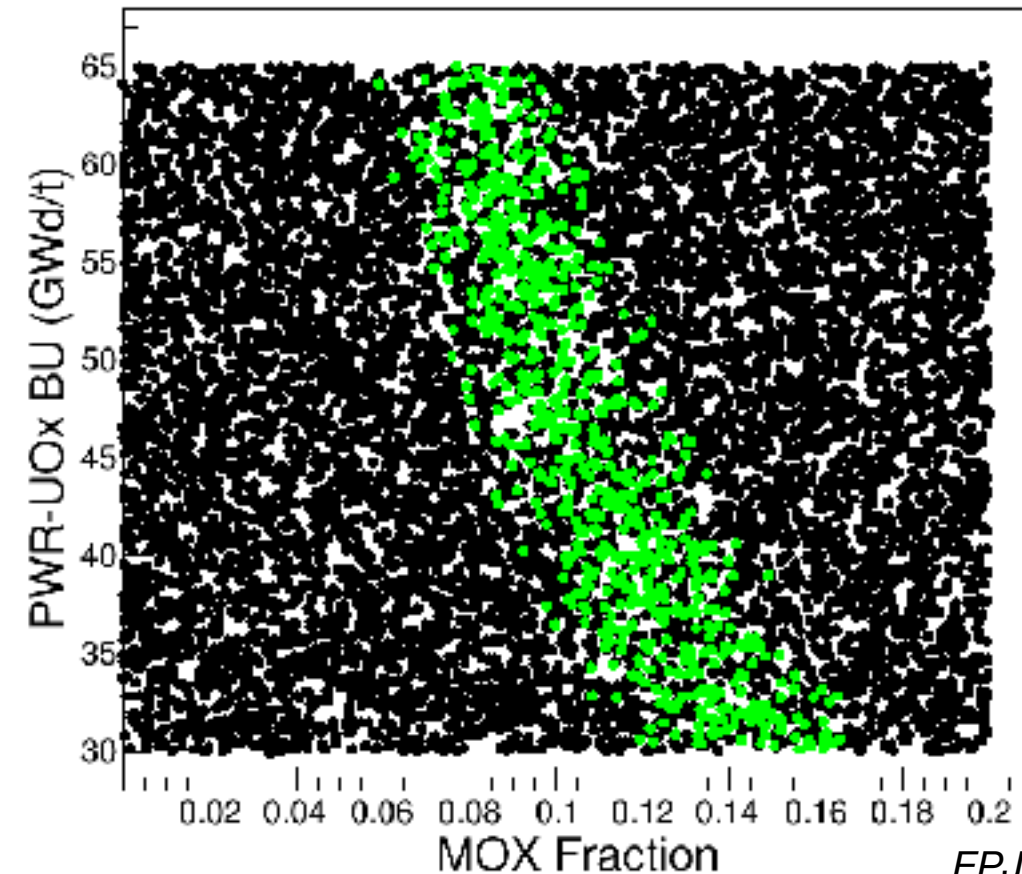
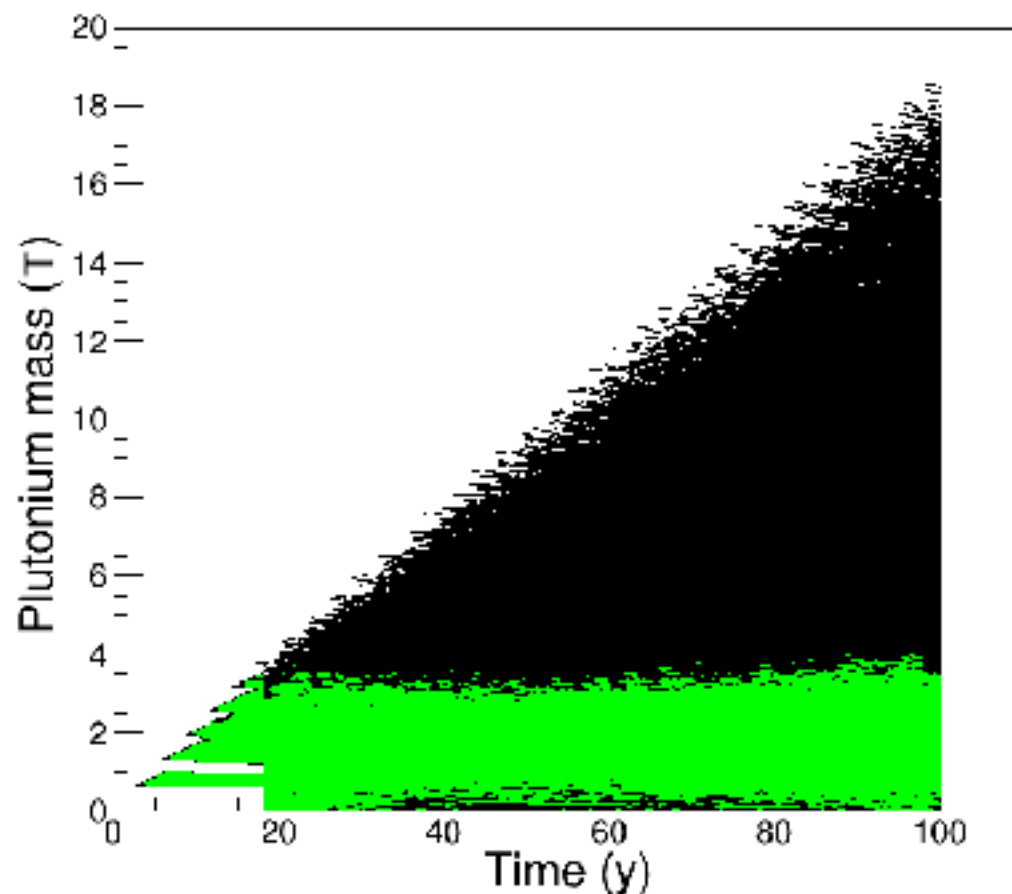
- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Développement des méthodes issues de l'analyse globale de sensibilité (2014) - NEEDS

- ▶ Relâchement des contraintes et définition d'un plan d'expérience
- ▶ Estimation d'indices de sensibilité (Sobol)
- ▶ Application de critères (objectifs) et mise en évidence de sous-espaces performants



EPJN N. Thiollière

- Problématique #1

- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Thèse de Jialy Liang (2018) - CNRS

- ▶ Etude de la robustesse des scénarios suite à une disruption sur les objectifs

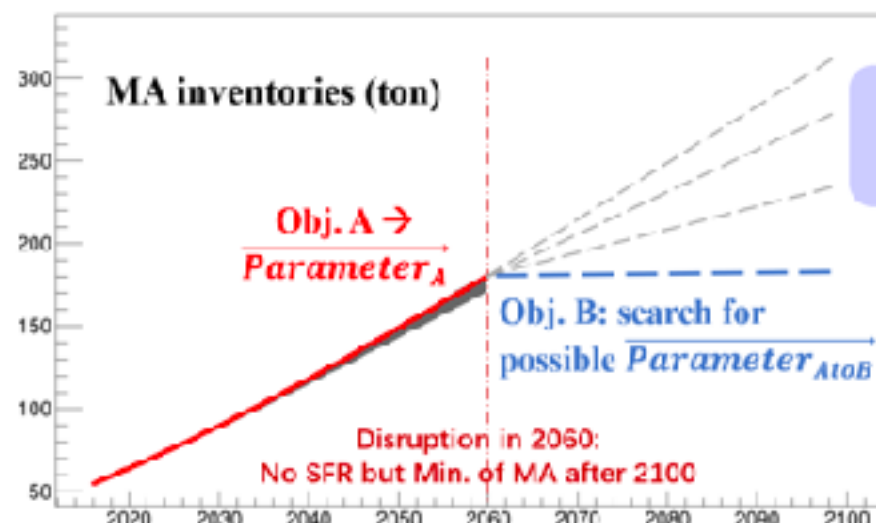


Obj. A: Substitution of PWRs by SFRs in year 2100

Obj. B: No SFR, but min. of minor actinides (MA)

ROBUSTNESS STUDY

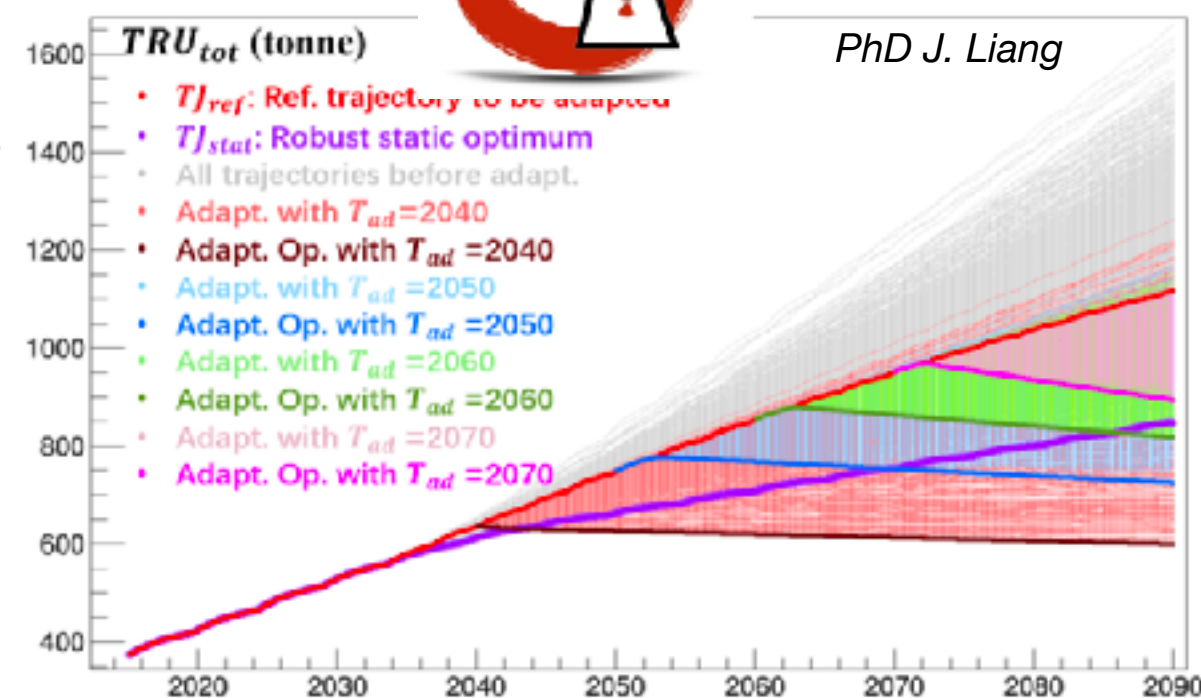
"Disruption": change of objective, e.g. switch Obj. A towards Obj. B



Re-sampling
& analysis

PhD J. Liang

Robustness ~ capacity of achieving objectives, under disruption
Flexibility ~ necessary change of parameters, after disruption



PhD J. Liang

- Forte contribution inter-disciplinaire

- ▶ Concept de résilience
- ▶ Apport de la sociologie
- ▶ Collaboration CEA Cadarache

- Problématique #1

- Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

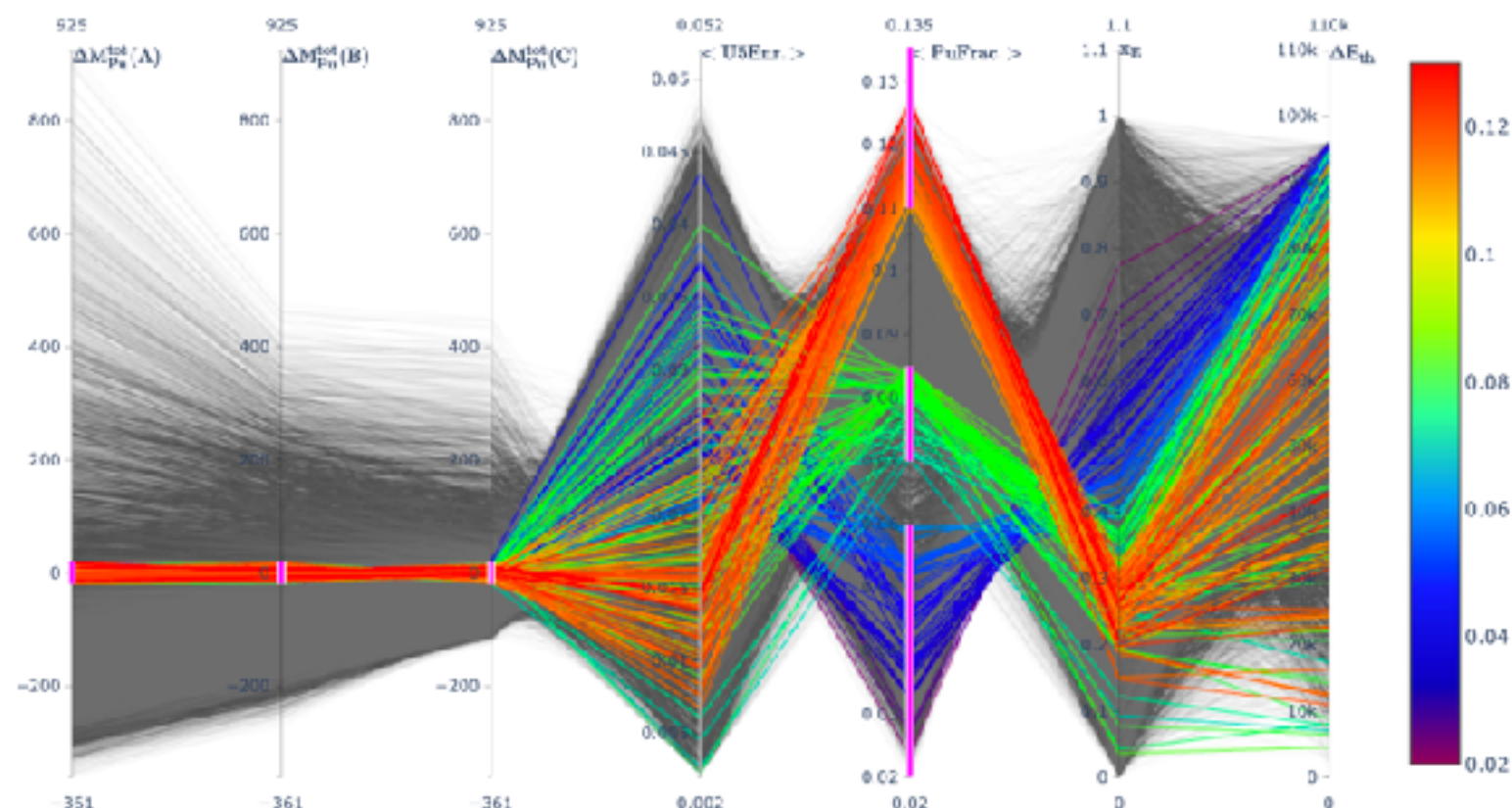
- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Perfectionnement des méthodes type Global Sensitivity Analysis

- Amélioration du calcul des indices de sensibilité
- Définition de nouvelles méthodes d'analyse et de représentation à N variables

Pu Stabilization Trajectories



- Renforcement des collaborations

- NEEDS
- CEA Cadarache

- Problématique #1

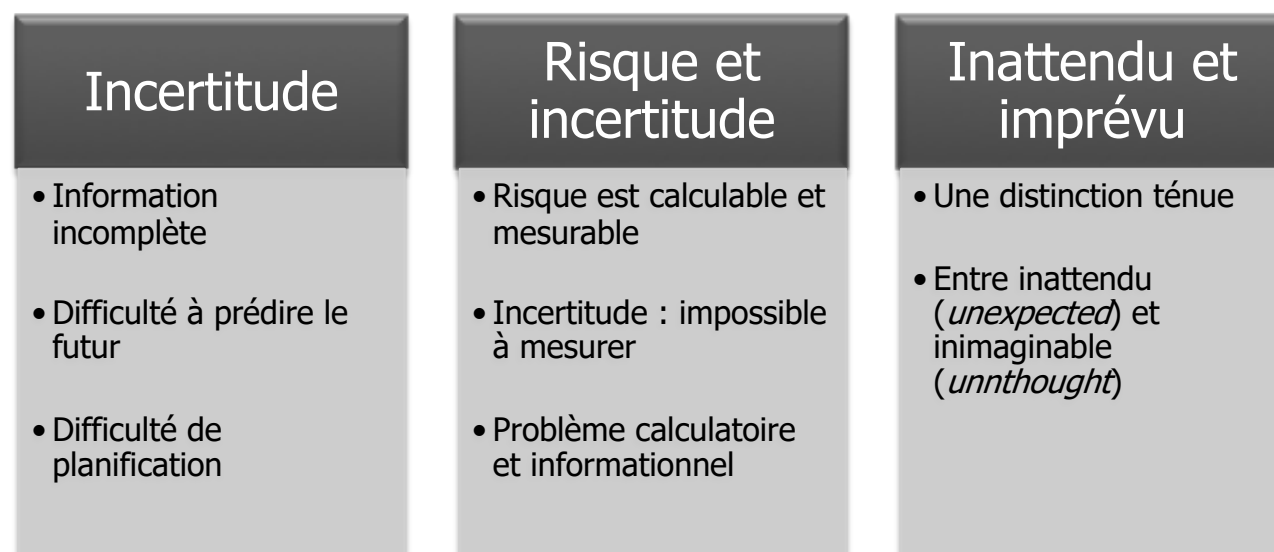
- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Poursuite de l'intégration du concept de résilience dans les scénarios

- ▶ Formalisation du concept et traduction de la sociologie vers la physique
- ▶ Re-visite des études de scénarios réalisées via ce nouveau formalisme



- Thèse de Jialy Liang

- Renforcement des collaborations

- ▶ via NEEDS
- ▶ CEA Cadarache
- ▶ Sociologie IMT Atlantique

Fiabilité en situation incertaine (débat robuste / résilience)

Deux formes d'incertitude doivent être prises en compte :

- les sources d'incertitude inhérentes ou endogènes à l'activité de travail ;
- celles exogènes à l'activité de travail directe, induites notamment par les évolutions du contexte socio-organisationnel

- Problématique #1

- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Problématique #1

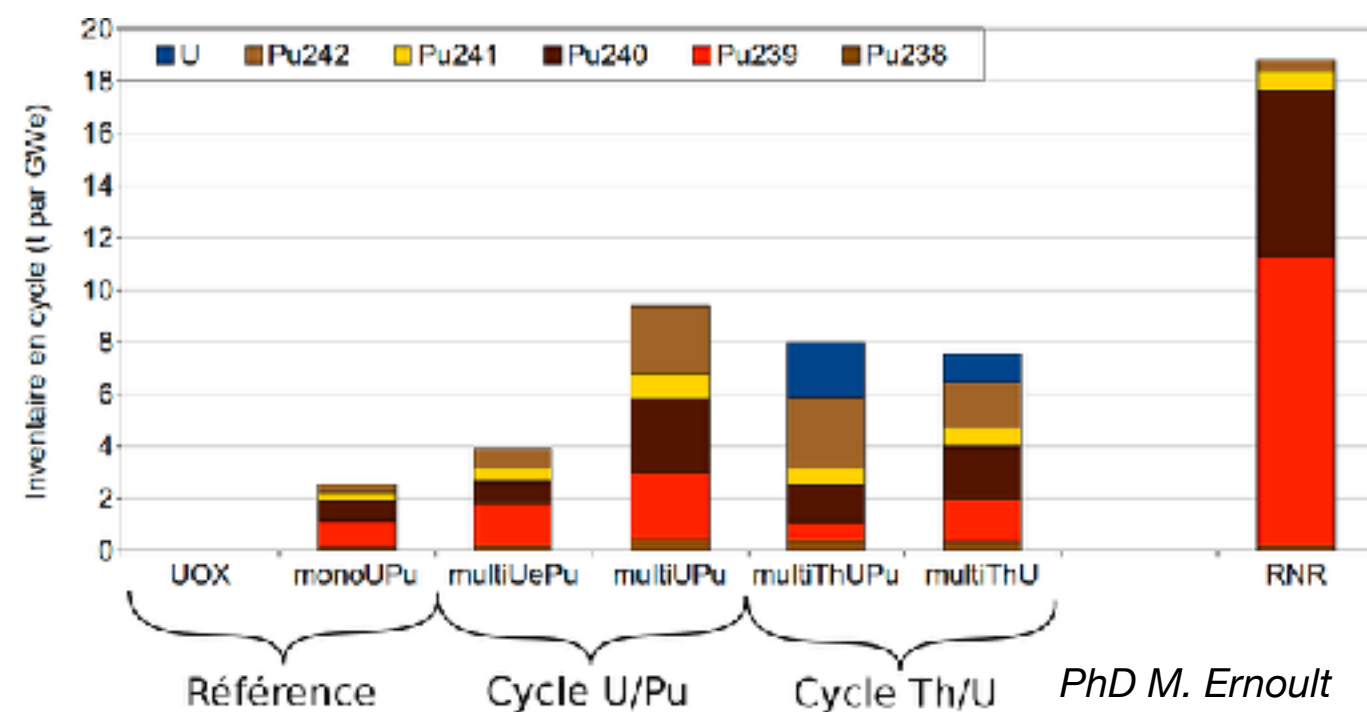
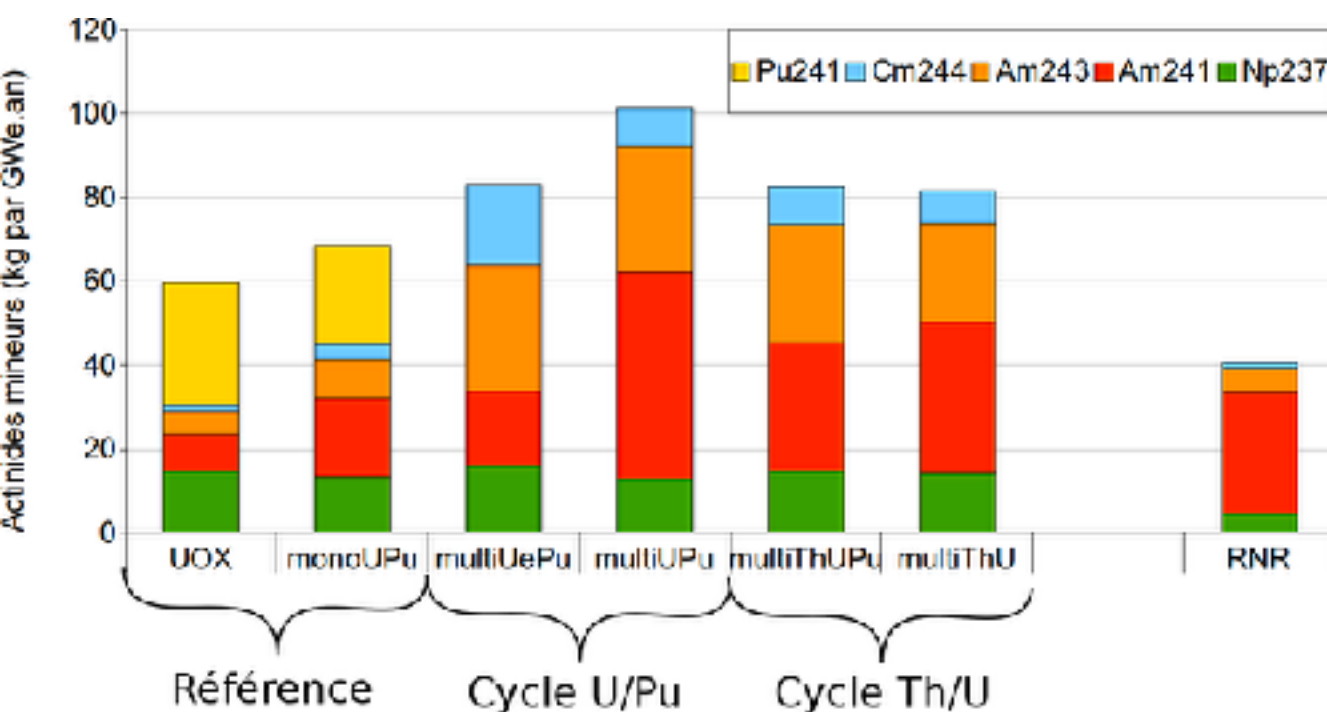
- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Thèse de Marc Ernoult (2011 - 2014) - CNRS

- ▶ Gestion avancée du plutonium dans les REP
- ▶ Etude de combustibles à base d'uranium et de thorium en REP
- ▶ Scénarios à l'équilibre



PhD M. Ernoult

- Problématique #1

- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

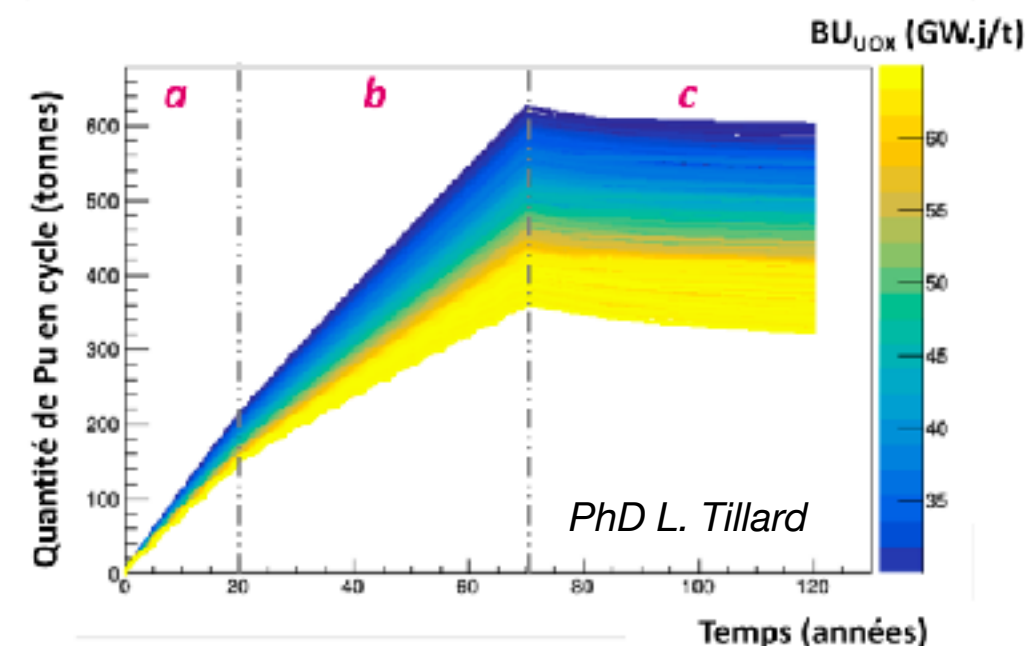
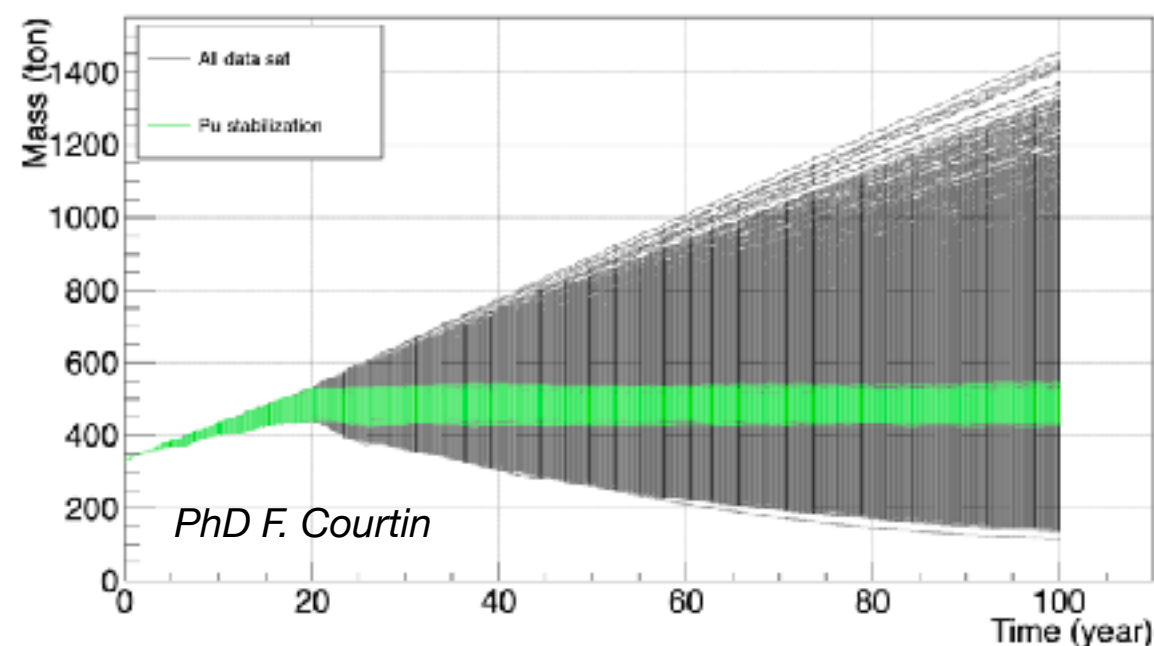
- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Thèse de Fanny Courtin (2014 - 2017) - CNRS

- ▶ Etude de scénarios de multi-recyclage du plutonium en REP

- Thèse de Léa Tillard (2016 - 2019) - IRSN / CNRS

- ▶ Etude de scénarios de gestion du plutonium dans un RNR de type ASTRID



- Problématique #1

- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires

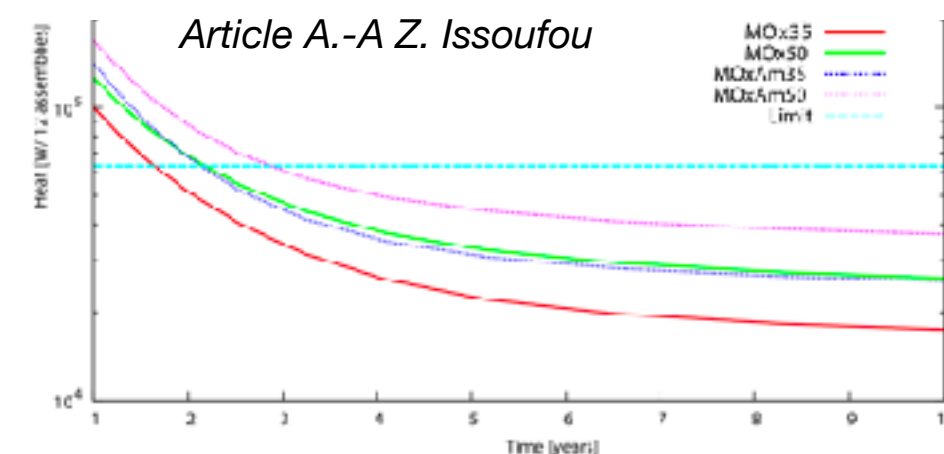
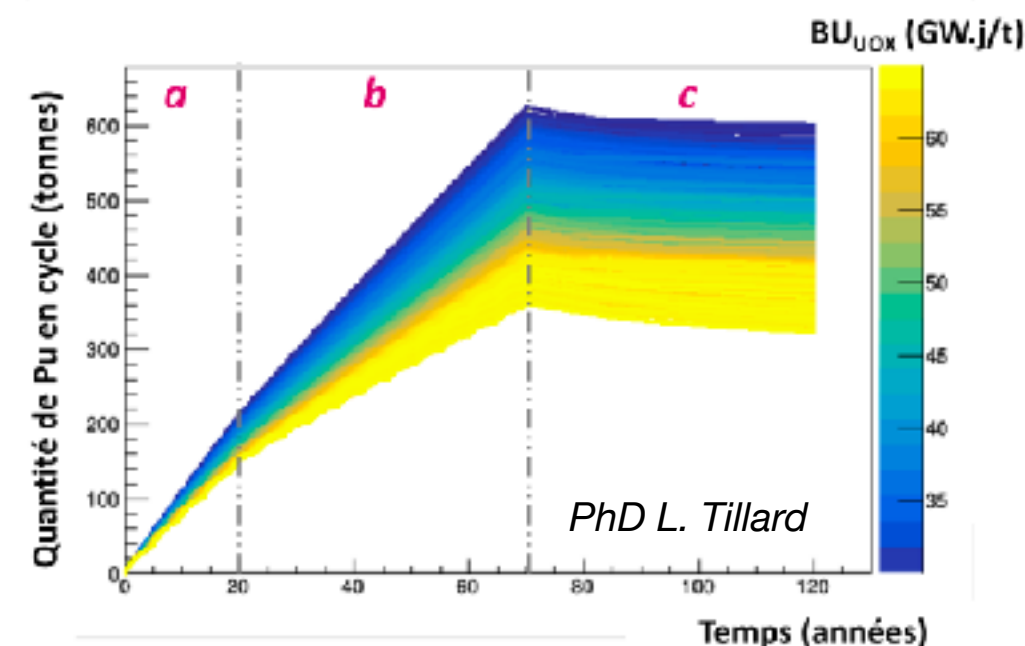
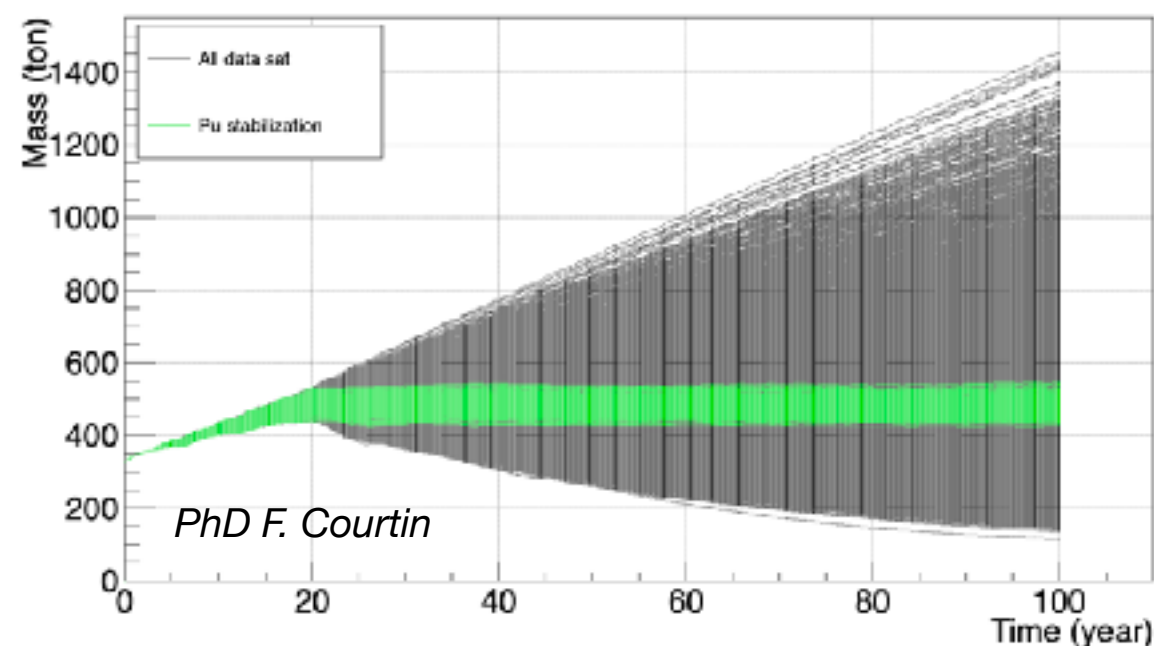
- ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
- ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
- ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)

- Thèse de Fanny Courtin (2014 - 2017) - CNRS

- ▶ Etude de scénarios de multi-recyclage du plutonium en REP

- Thèse de Léa Tillard (2016 - 2019) - IRSN / CNRS

- ▶ Etude de scénarios de gestion du plutonium dans un RNR de type ASTRID



- Post-Doc de A.-A. Zakari-Issoufou (2015 - 2018) - CNRS

- ▶ Capacité des REP à mono-recycler l'Americium et évaluation de l'impact sur les assemblages combustibles

- Problématique #1
 - ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?
- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires
 - ▶ Développement de l'outil de simulation dynamique du cycle CLASS
 - ▶ Mise en oeuvre de nouvelles méthodologies d'analyse pour les scénarios nucléaires
 - ▶ Études de systèmes nucléaires innovants et de gestions du combustible alternatives (gestion du plutonium)
- L'abandon du projet ASTRID ré-ouvre de nouvelles perspectives de gestion du plutonium
 - ▶ Le parc nucléaire français de ce siècle sera composé de REP (ou pas...)
 - ▶ Des études poussées de recyclage des matières en REP doivent être menées
 - ▶ Les principaux acteurs (EdF, CEA, etc.) relancent ce type d'étude
- Approfondissement des études sur la capacité des REP à multirecycliser le plutonium
 - ▶ Analyses des coefficients de sureté en fonction de l'isotopie Pu @ BOC
 - ▶ Estimation des flux de matières et des besoins en terme de capacité de traitement
 - ▶ Redéfinition des plans d'expérience d'évolution du parc
 - ▶ Détermination des couts comparés entre les différentes gestion possibles

- Problématique #1
 - ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?
- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios
 - ▶ Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
 - ▶ Impact des fonctionnalités au coeur des simulateur du cycle nucléaire sur les sorties

- Problématique #1

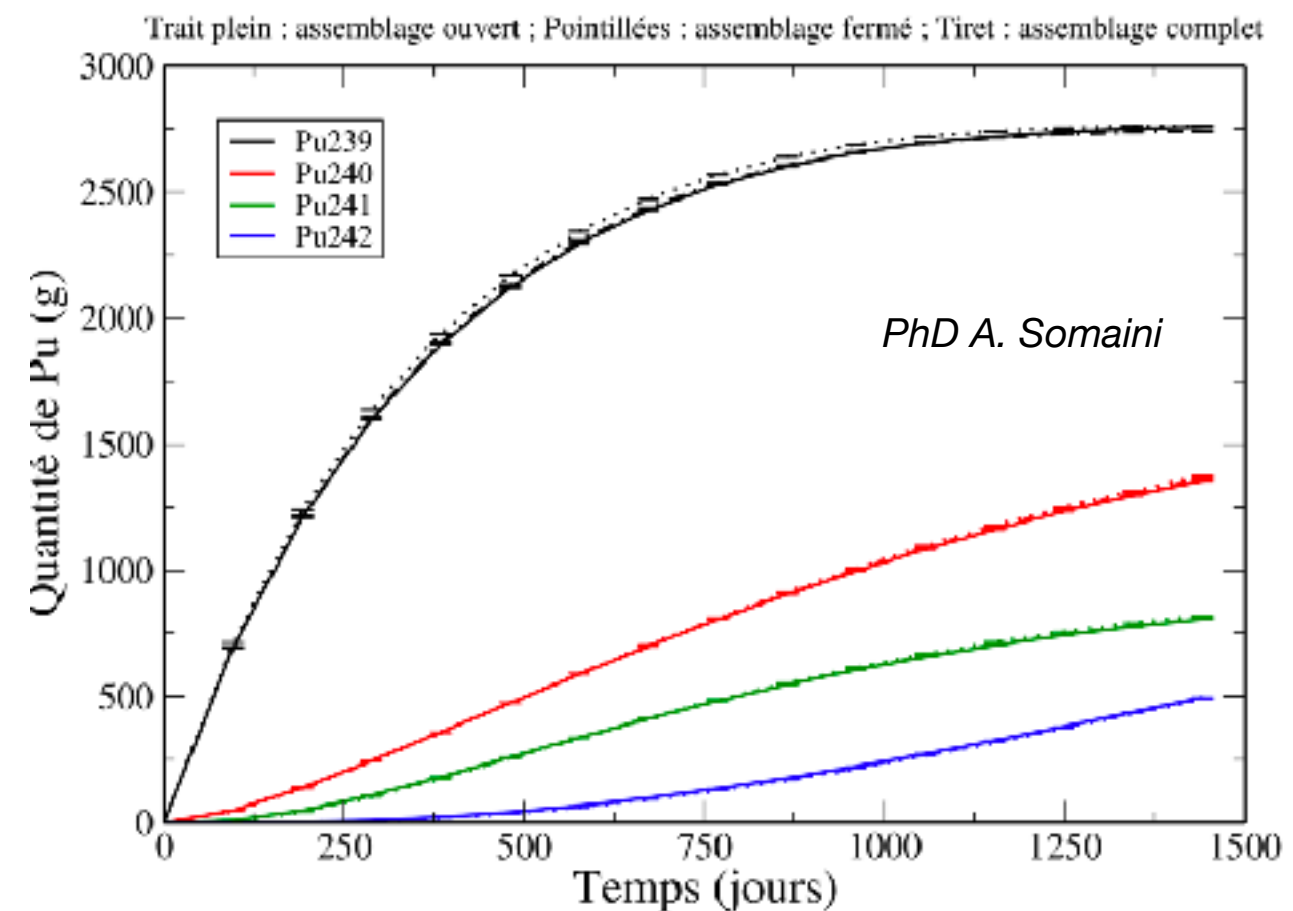
- Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios

- Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
- Impact des fonctionnalités au coeur des simulateurs du cycle nucléaire sur les sorties

- Thèse de Alice Somaini (2014 - 2017) - CNRS

- Analyse des incertitudes induites par les calculs de neutronique basés sur des assemblages



- Problématique #1

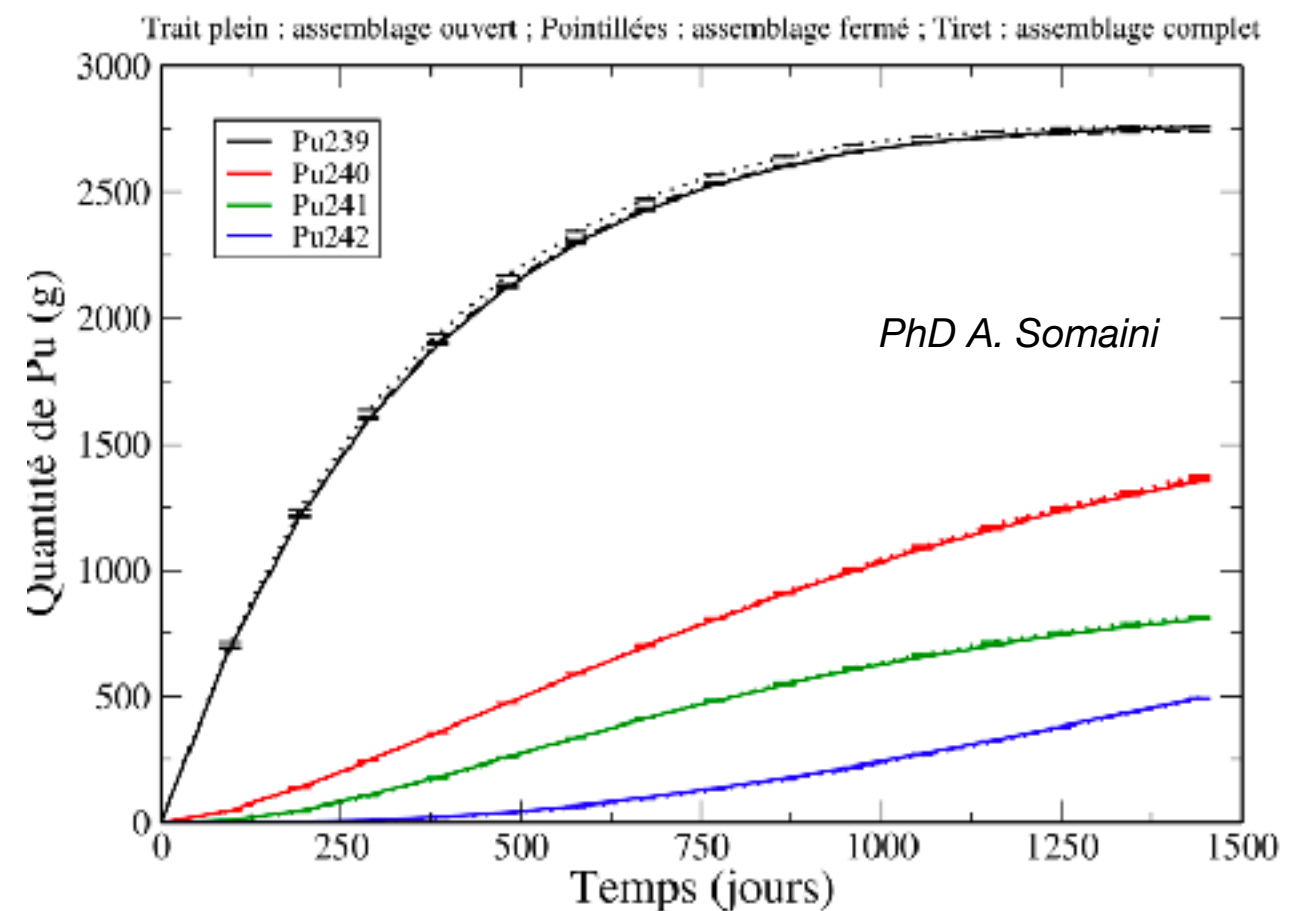
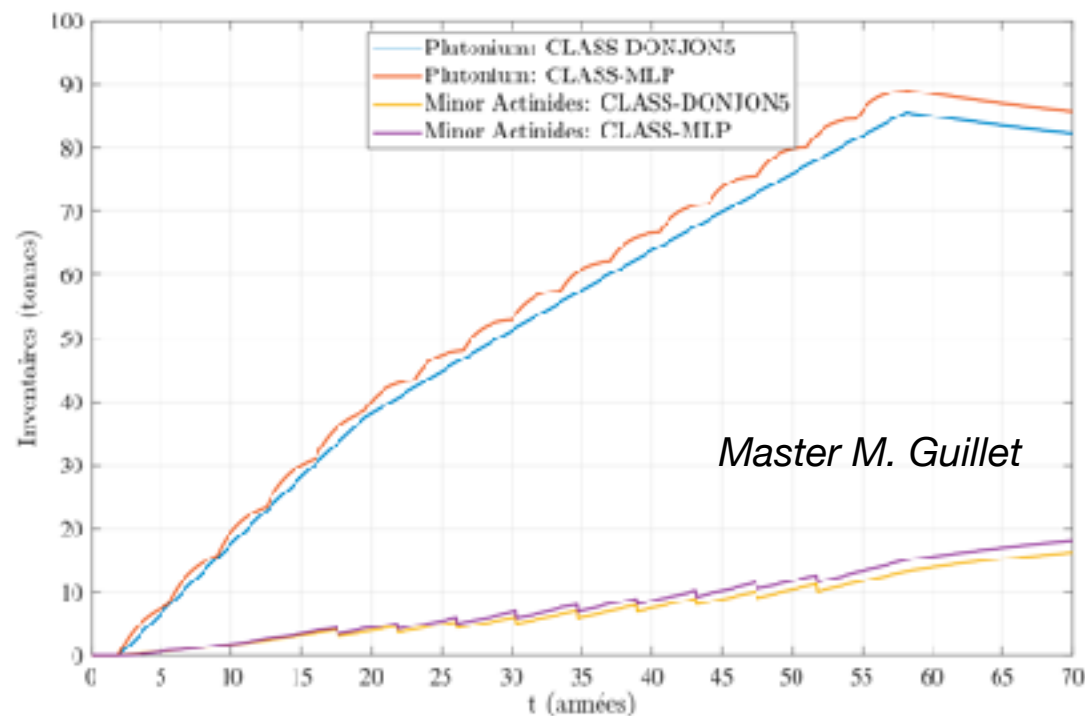
- Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios

- Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
- Impact des fonctionnalités au coeur des simulateurs du cycle nucléaire sur les sorties

- Thèse de Alice Somaini (2014 - 2017) - CNRS

- Analyse des incertitudes induites par les calculs de neutronique basés sur des assemblages



- Master of Science de Martin Guillet (2017 - 2019) - CNRS / Poly. Montréal

- Développement d'un modèle de réacteur REP basé sur des calculs couplés assemblages - coeurs

- Problématique #1
 - ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?
- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios
 - ▶ Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
 - ▶ Impact des fonctionnalités au coeur des simulateur du cycle nucléaire sur les sorties
- Master of Science de Maxime Paradis (2019) - CNRS / Poly. Montréal
 - ▶ Prise en compte de plans de chargement complexes à l'échelle du coeur pour les modèles de réacteurs
 - ▶ Pérennisation de la collaboration CNRS - Poly. Montréal
- Modélisation fine du réflecteur d'un coeur de REP
 - ▶ Impact fort sur l'albédo et donc la nappe de flux
 - ▶ Influence fortement le calcul de l'évolution de l'inventaire
- Quantification et propagation des incertitudes dans les calculs de scénarios nucléaires
 - ▶ Identification et quantification des sources d'incertitudes
 - ▶ Calculs en total Monte-Carlo pour estimer les incertitudes
 - ▶ Formalisation mathématique du problème
 - ▶ Proposition d'une méthodologie générique

- Problématique #1
 - ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?
- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios
 - ▶ Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
 - ▶ Impact des fonctionnalités au coeur des simulateurs du cycle nucléaire sur les sorties

- Problématique #1

- ▶ Quel est l'impact d'un changement de stratégie (réacteur et combustible) sur les inventaires de matières radioactives (ressources, déchets, focus sur la gestion du plutonium) ?

- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios

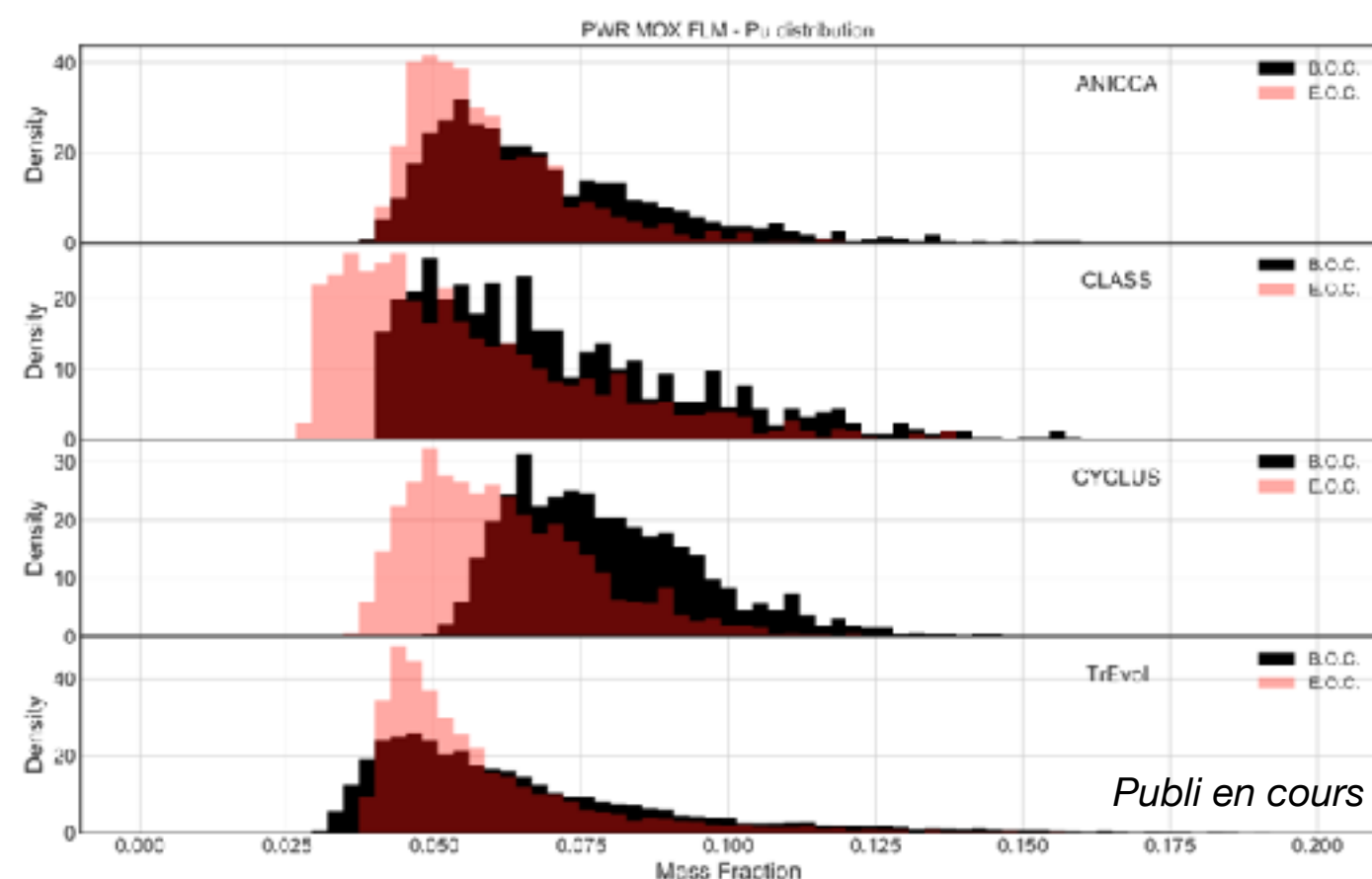
- ▶ Optimisation des modèles de réacteur, quantification et propagation des incertitudes dans les scénarios
- ▶ Impact des fonctionnalités au coeur des simulateurs du cycle nucléaire sur les sorties

- Projet FIT (2016) - Piloté par le CNRS,

- ▶ Collaboration internationale : 5 laboratoires européens et 2 laboratoires américains
- ▶ Problématique : Quel est le niveau de détail minimum requis pour un simulateur du cycle en fonction de l'étude et de l'intervalle de confiance souhaité ?
- ▶ Méthodologie : Choix d'une fonctionnalité à tester, design d'un exercice et résolution indépendante
- ▶ Projet fédérateur dans le cadre des TWo-FCS

- Prospectives

- ▶ Poursuite du pilotage
- ▶ Proposition de mise en place d'un MOU
- ▶ Recherche de nouveaux partenaires
- ▶ Finaliser le 1^{er} article de la collaboration



- Problématique #1 - Scénarios nucléaires (Physique des réacteurs et du cycle)
 - CNRS/IN2P3, NEEDS.
- Axe de recherche #1 : Études de scénarios électronucléaires
 - 1 thèse en cours (IPNO)
 - 1 thèse en 2020 ou 2021
- Axe de recherche #2 : Amélioration de la confiance dans les sorties des scénarios
 - 1 master of Science en cours (Polytech. Montréal - IPNO)
- Problématique #2 - Scénarios de transition énergétique (Economie et Physique)
 - CNRS/IN2P3, NEEDS.
- Axe de recherche : Développement d'un modèle de production multi-sectoriel
 - 1 thèse pour la modélisation économique
 - 1 post-doc pour la modélisation physique
- Problématique #3 - Interaction intermittence / nucléaire (Economie et Physique)
 - 1 PEPS accepté
- Problématique #4 - Rôles et usages des scénarios (Sociologie et Physique)
 - NEEDS
 - 1 thèse pour 2021