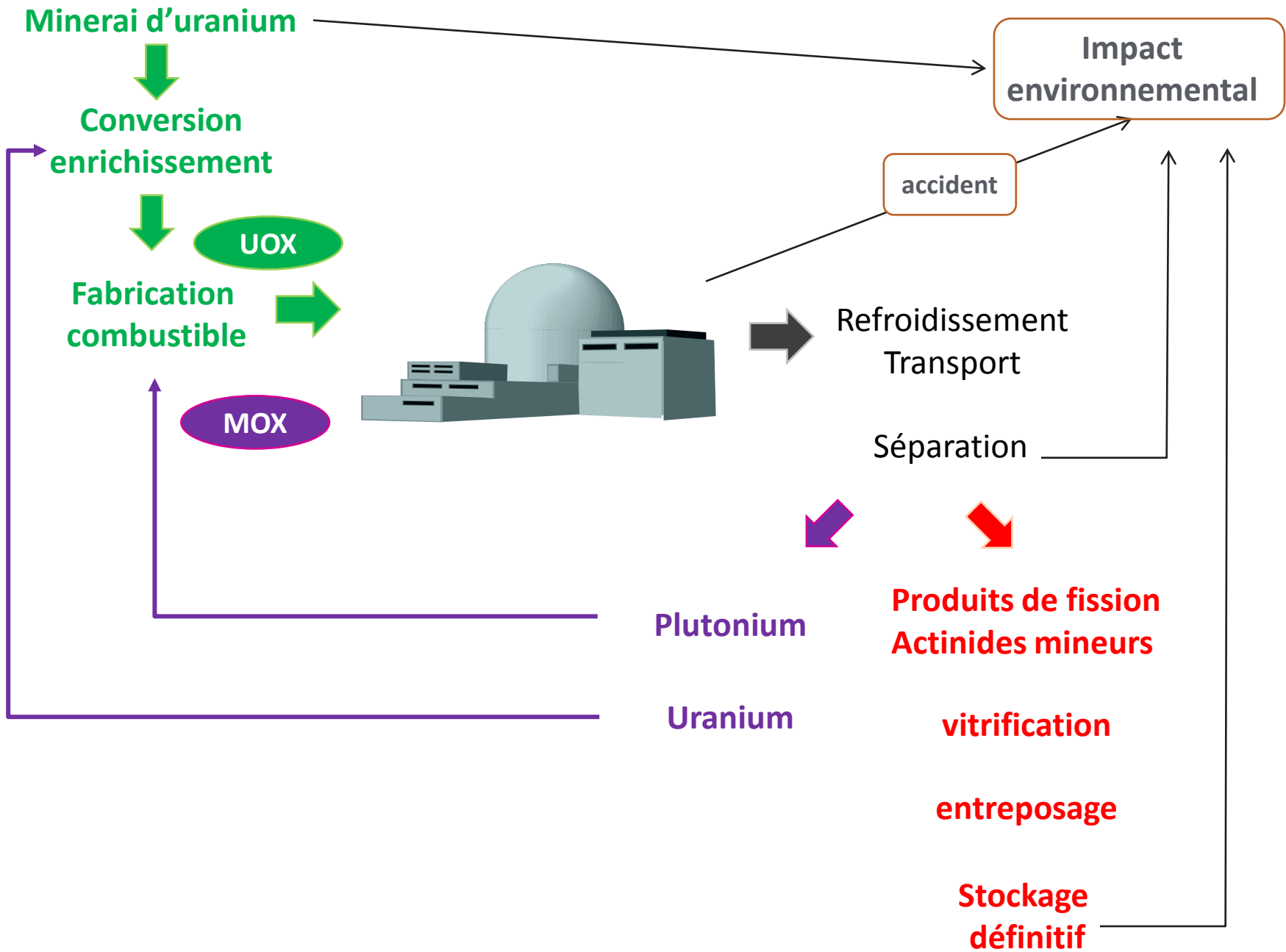


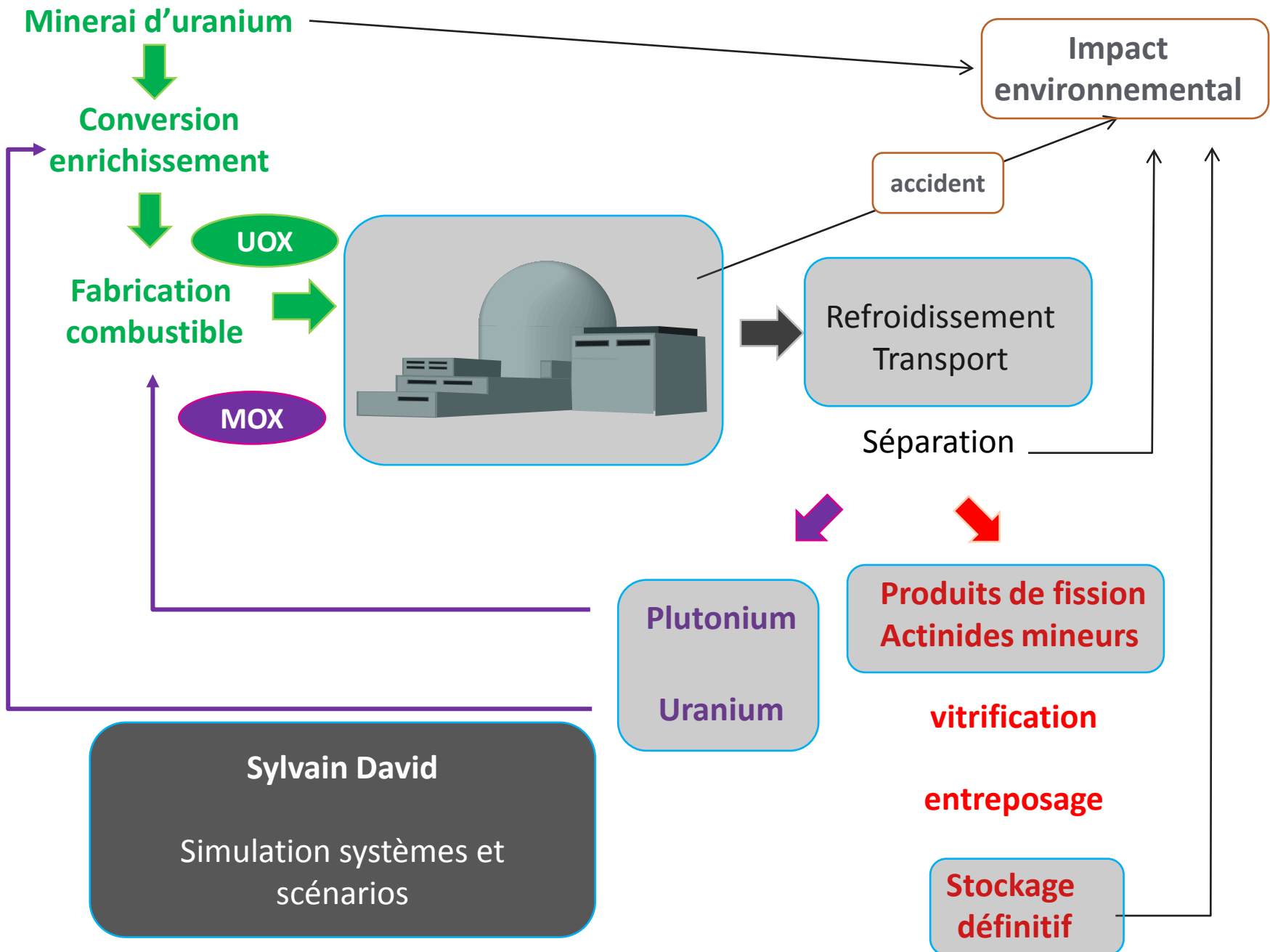
Physique et Chimie pour l'énergie nucléaire

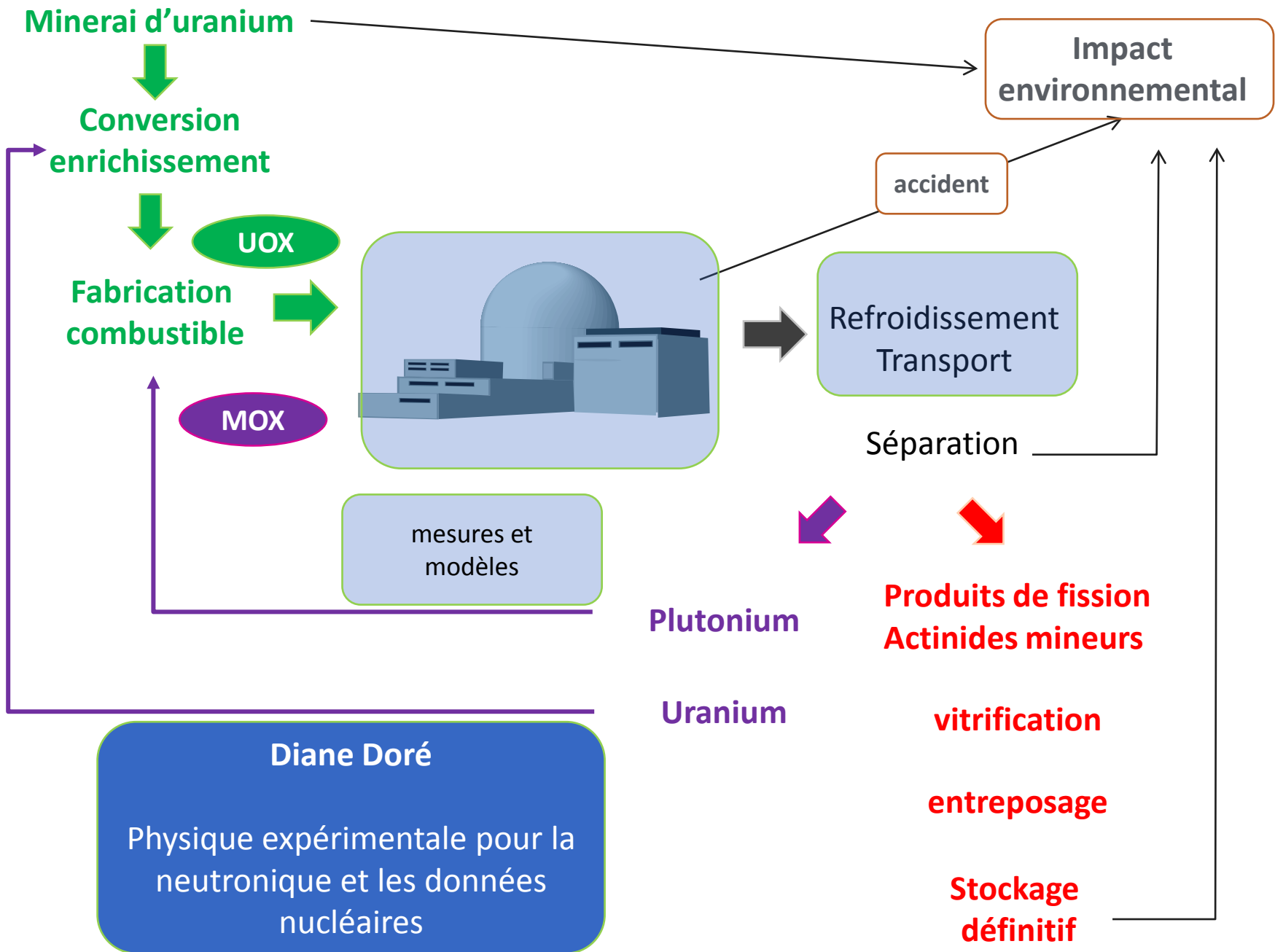
Sylvain David

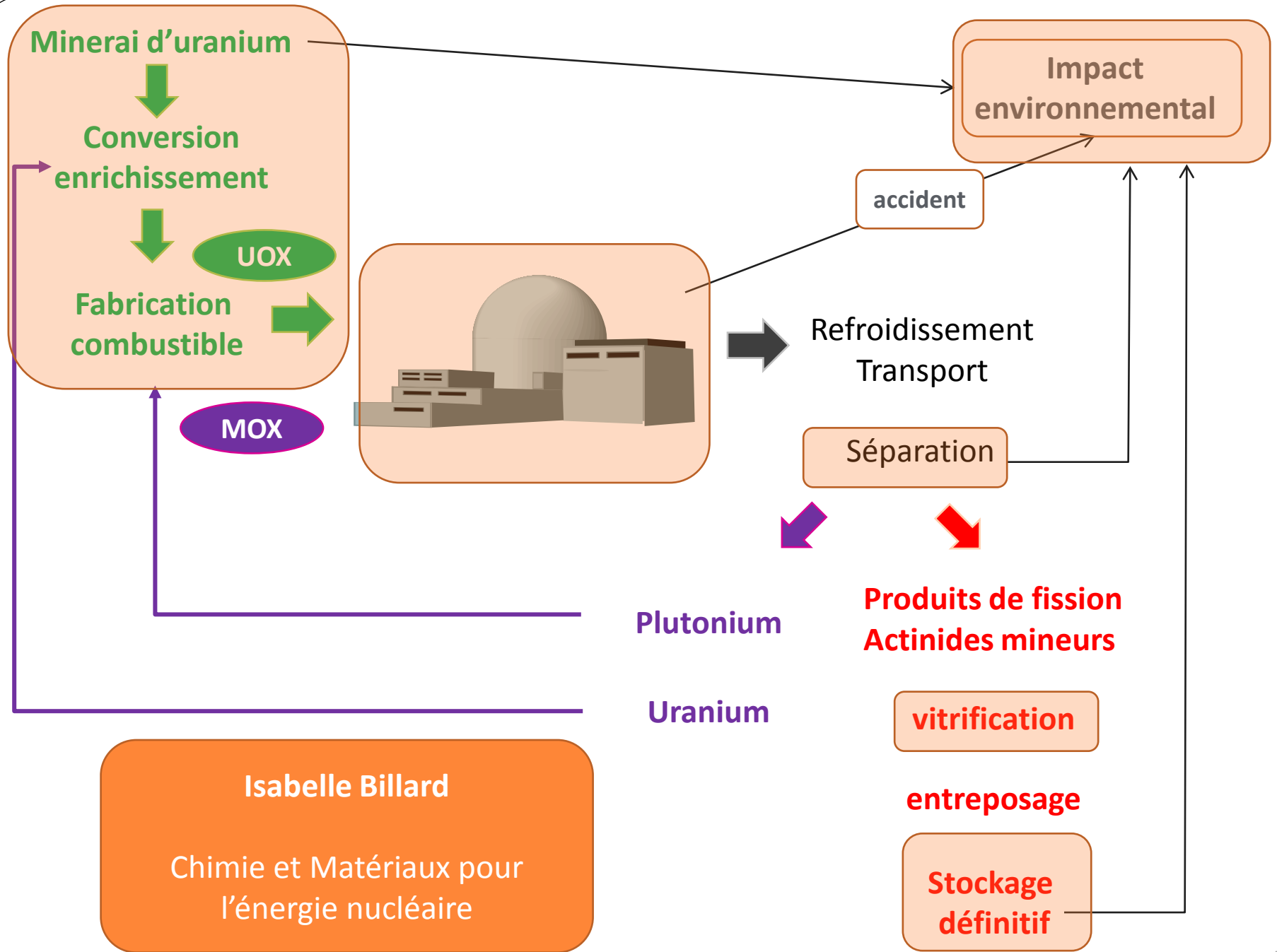
Diane Doré

Isabelle Billard









Isabelle Billard
 Chimie et Matériaux pour
 l'énergie nucléaire

Contexte

Loi de 2006 : focalisée sur la gestion des déchets actuels, l'enfouissement

Rôle de la science académique

- Participer aux grands axes de R&D nationaux et internationaux sur les déchets et les systèmes nucléaires du futur « standard »
- Savoir éclairer le débat de façon scientifique et transparente, expertise, analyse

Auditions par la Commission Nationale d'Evaluation, l'OPECST, l'Académie des Sciences, comités interministériels sur les déchets (COSRAC) et sur les systèmes du futur (COSSYN), débat public (CNDP)

RDV de la loi de 2006

- **Débat parlementaire réacteurs rapide, transmutation : 2012-2013**
- **Débat public 2013 : stockage des déchets, projet Cigeo**

Savoir mener des recherches en dehors du cadre de la loi

- Explorer des voies innovantes pour la production d'énergie et la gestion des déchets
- Faire de la science en amont, acquérir des connaissances fondamentales
- Développer des méthodes innovantes basées sur les techniques de la recherche fondamentale (prolifération neutrinos, pilotage réacteur, données nucléaires, instrumentation, détection ...)

NEEDS=Nucléaire: Energie, Environnement, Déchets, Société

Grands défis	Structures existantes	Partenaires identifiés
Systèmes nucléaires	GEDEPEON, MYRHA, ANSF, APHIT	CNRS, CEA, AREVA, EDF, IRSN
Traitement et conditionnement des déchets radioactifs	PARIS, MATINEX	CNRS, CEA, AREVA, EDF
Traitement / Recyclage du combustible	PARIS	CNRS, CEA, AREVA, EDF
Caractérisation et modélisation du stockage géologique	FORPRO, TRASSE	CNRS, CEA, ANDRA, EDF, IRSN
Impact des activités nucléaires sur l'environnement	TRASSE, PARIS, FORPRO	CNRS, CEA, EDF, IRSN, ANDRA
Ressources : mines, procédés, éco.	GUTEC, ACSSON, CatMat	CNRS, CEA, AREVA,
Nucléaire, risque et société	ACSSON, CatMat	CNRS +...
Matériaux pour l'énergie nucléaire	MATINEX, GEDEPEON	CNRS, CEA, EDF, AREVA
Compétences		
SHS	ACSSON, CatMat	CNRS +...
Mathématiques appliquées	MOMAS	CNRS, CEA, BRGM, EDF, AREVA, IRSN, ANDRA
Physico-chimie & Modélisation	PARIS	CEA, CNRS
Données nucléaires	GEDEPEON	CEA, CNRS

Etudes de systèmes et scénarios

S. David, D. Doré, I. Billard

Laboratoires IN2P3 impliqués : IPNO, LPSC, Subatech

La simulation des réacteurs et des scénarios une discipline ouverte vers l'interdisciplinarité

Cœur du programme du projet fédérateur 'Systèmes Nucléaires de NEEDS

Organisation autour de 4 axes

Outils : nouvelles méthodes pour la simulation des réacteurs

- Evolution du combustible
- Paramètres de sûreté de base
- Simulation d'accidents, cinétique, couplage neutronique/thermohydraulique

Les études systèmes innovants

- Les réacteurs régénérateurs, RNR Sodium, réacteurs à sels fondus
- Les réacteurs à eau innovants, non régénérateurs, recyclage Pu, utilisation du thorium
- Les ADS

Les études de scénarios

- Scénarios à l'équilibre, RNR Sodium, REP thoriés, RSF thorium, transmutation des déchets, ADS incinérateurs
- Transitions vers l'équilibre
- Scénarios de fin de jeu : incinération Pu et actinides mineurs

Les activités interdisciplinaires

Contexte post-Fukushima

- Les perspectives « systèmes et scénarios » dans le contexte post-Fukushima
- Un « retard » possible du déploiement annoncé du nucléaire : prolongation du potentiel de production des réacteurs à eau
- Une « ré-ouverture » des recherches sur les systèmes du futur non standards ?
- Une thématique « sûreté » à investir, notamment sur les systèmes du futur
- Une remise en question du statut de plutonium ?
- Un lien plus fort avec les sciences humaines et sociales
- Un fort besoin d'expertise vers la société

Consommation de ressource

Filières actuelles

Basée sur $^{235}\text{U} = 0,7\%$ de U nat
Seul noyau fissile naturel

Consommation pour 1 GWe.an

fissionné	1 t
U enrichi 4%	27t
<u>U naturel</u>	<u>200 t</u>

Possibilité de réduire à 100 t/GWe.an
réduction ^{235}U dans U appauvri
recyclage U
recyclage Pu
Sans rupture technologique

Réduction supplémentaire 70 t/Gwe.an
Réacteurs à eau innovants
Cycle thorium
Eau lourde, sous-modération, ...

Filières régénératrices



Noyau
fertile

Noyau
fissile

Le Pu fissionné est régénéré : Masse Pu = cte
Seul l' ^{238}U est consommé : 1 t / (GWe.an)

Technologie plus complexe (donc plus chère)
Réacteurs à neutrons rapides

Cycle thorium possible



Demande nucléaire mondiale et consommation d'Uranium

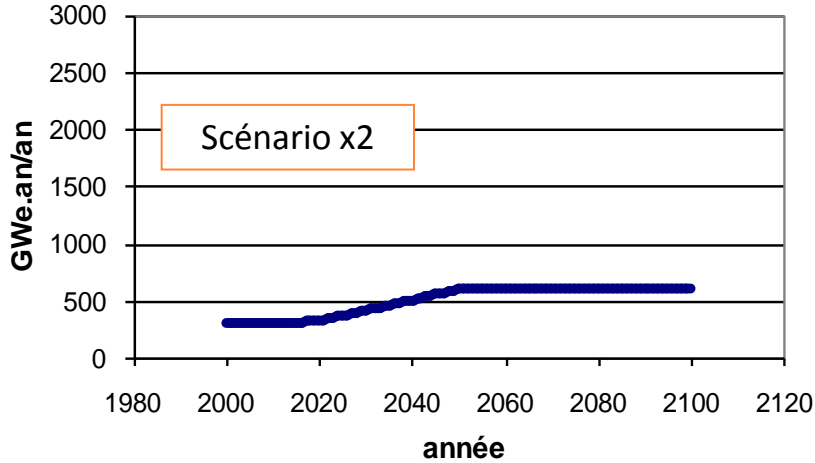
Scénario 100% Gen2 + Gen3

— 200t/(GWe.an)

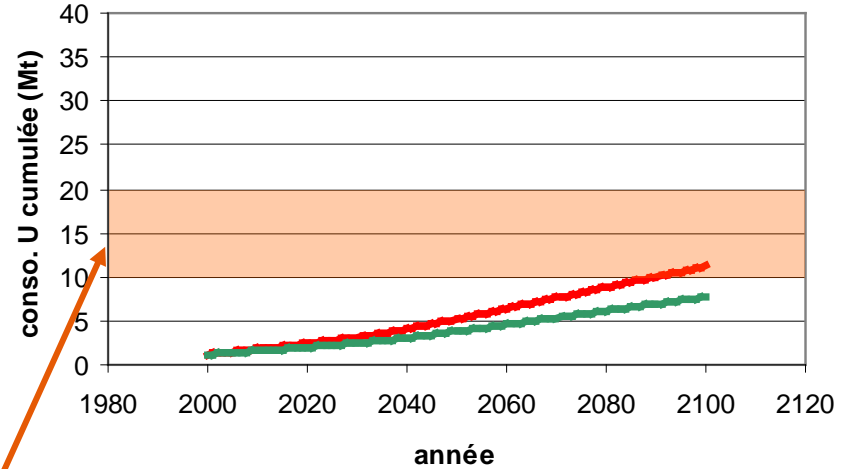
— 130t/(GWe.an)

↘ rejet 235 dans U_{app} , recyclage U, Pu

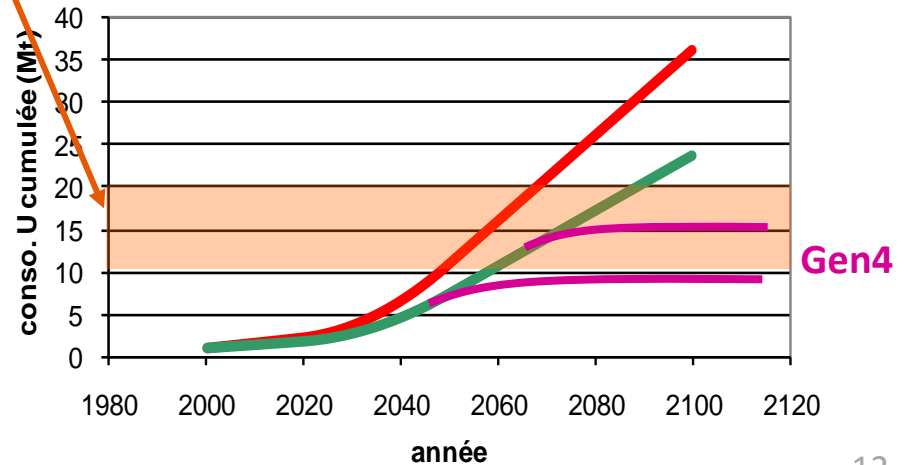
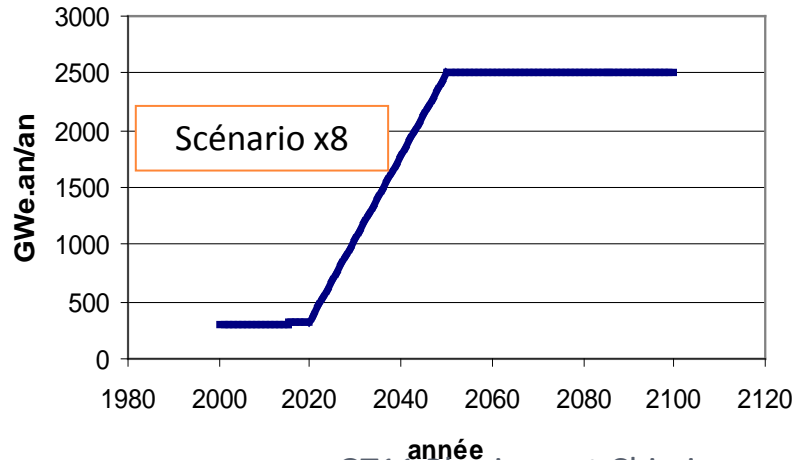
Demande nucléaire



Consommation cumulée d'U naturel



Ressources estimées à 400 \$/kg



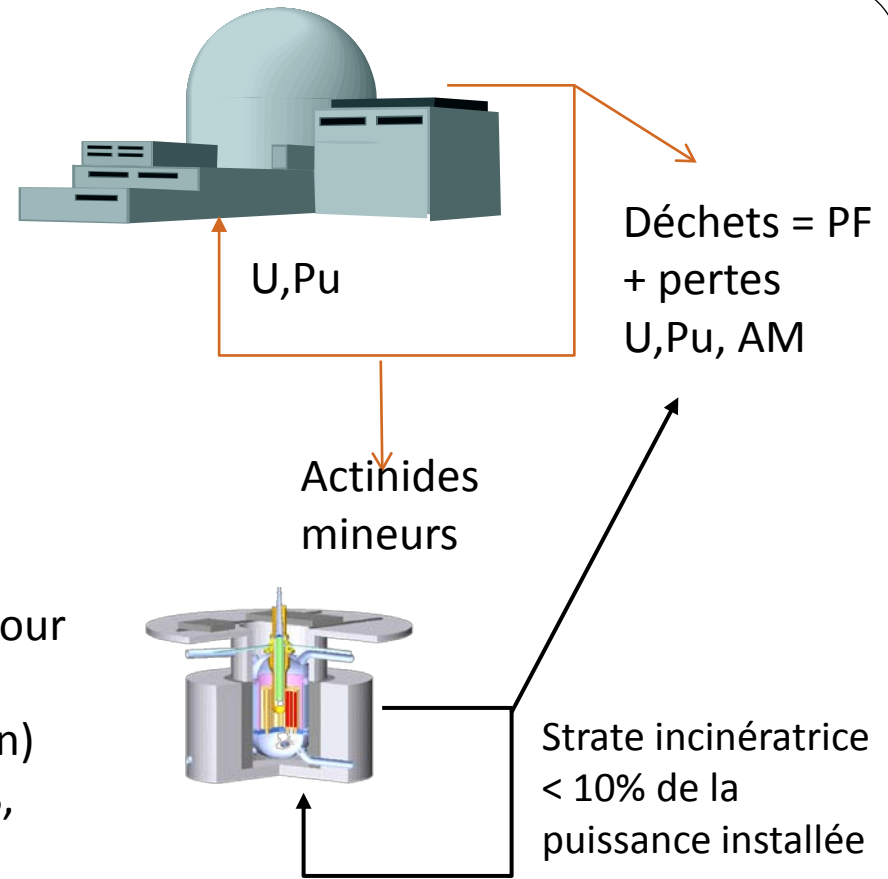
Les ADS incinérateurs d'actinides mineurs

Des études concepts orientées réacteurs

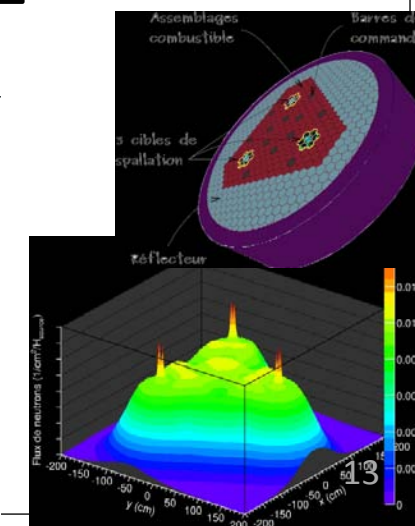
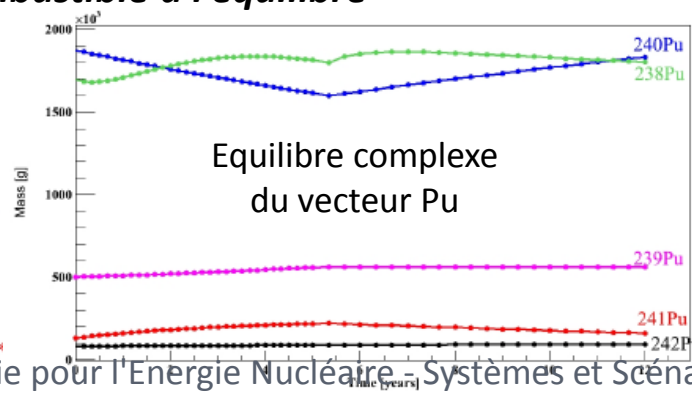
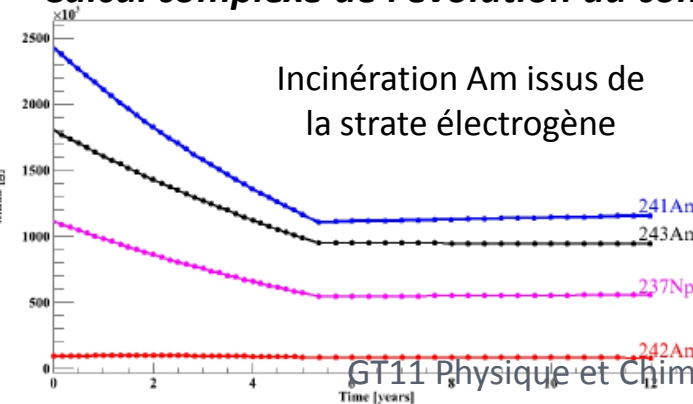
La transmutation des actinides mineurs nécessite de disposer des neutrons rapides
Si le nucléaire se développe peu, la régénération n'est pas indispensable, et les RNR non plus.

Enjeu des études

- Augmenter la puissance « standard » des ADS pour limiter le nombre de machines incinératrices
- Etudier des scénarios de déploiement (transition)
- Mener des études de sûreté spécifique aux ADS, transitoires rapides, effets de température, etc...

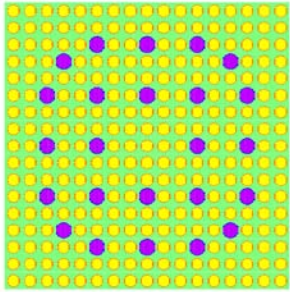


Calcul complexe de l'évolution du combustible à l'équilibre

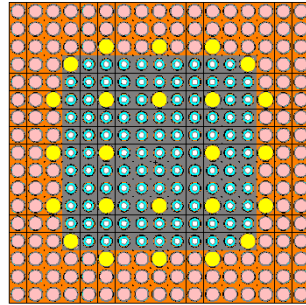


Prolonger le potentiel énergétique des réacteurs de 3^{ème} génération

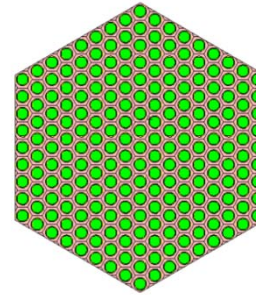
Explorer la potentialité du cycle thorium pour gérer le plutonium et diminuer continument la consommation d'uranium grâce au meilleur bilan neutronique du cycle thorium



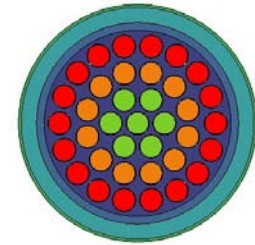
REP



REP hétérogène,
sous modéré



bouillants



candu

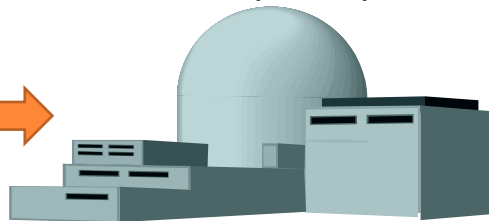
Outils opérationnels pour décrire les performances neutroniques et les aspects scénarios de ces systèmes à l'équilibre

Aller vers des études « concepts » incluant les aspects de thermohydraulique et sûreté en fonctionnement ou en situation accidentelle

U naturel



U enrichi

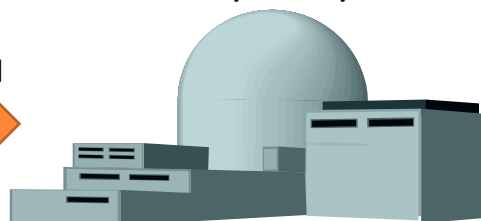


EPR
UOX standard
200t Unat/Gwe/an

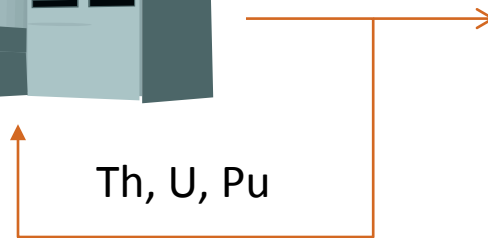
Th naturel



Pu



EPR
MOX Thorié Th/Pu
1 t Th/Gwe/an

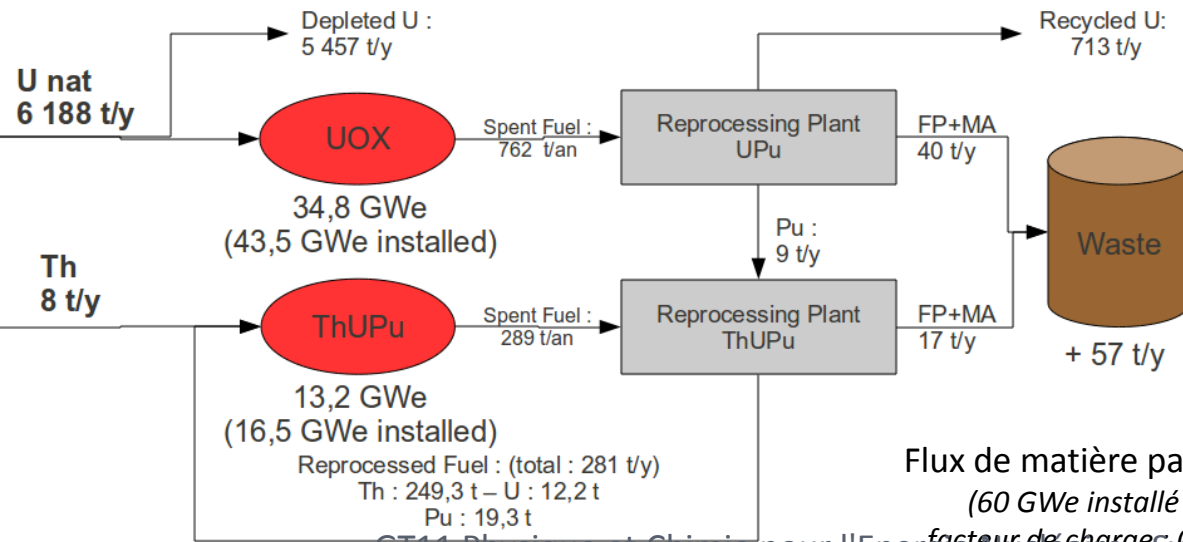


Déchets
PF
Actinides mineurs

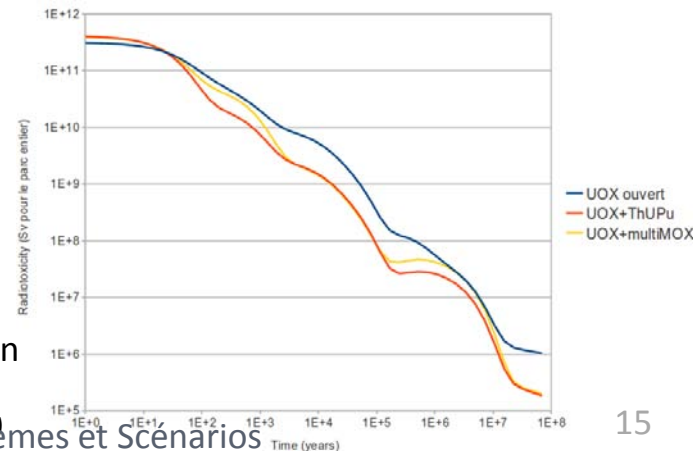
Outils disponibles pour caractériser un scénario à l'équilibre

Flux de matière, caractéristique du comb. utilisé en piscines, transport, retraitement, fabrication, ...

Économie en Unat = 27,5%



Comparaison des déchets U ou Th en REP



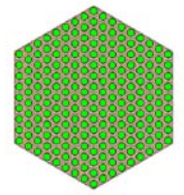
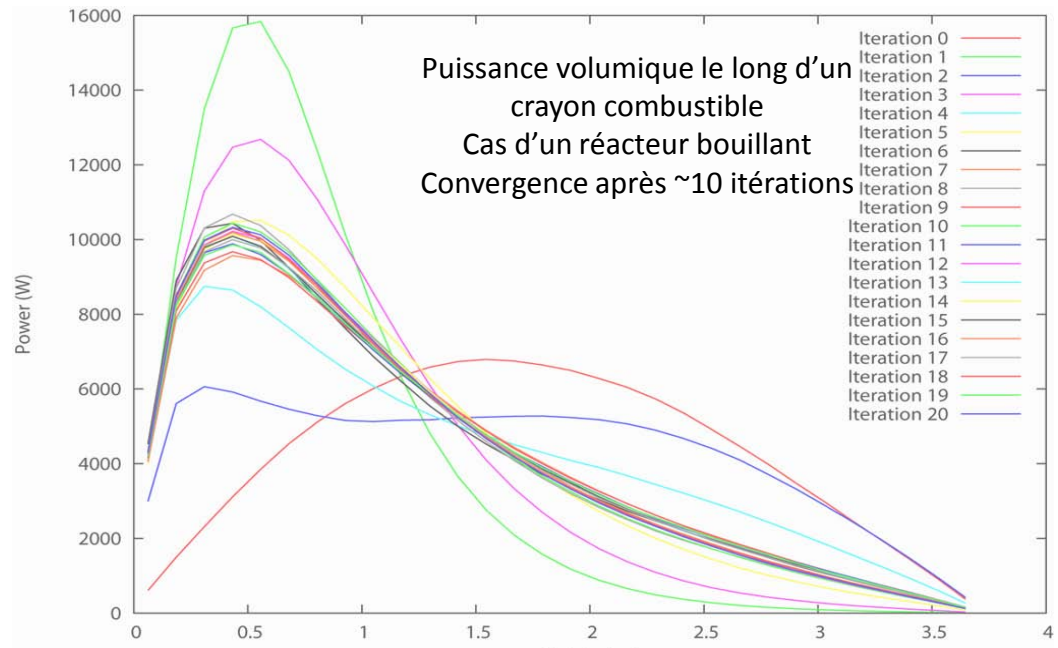
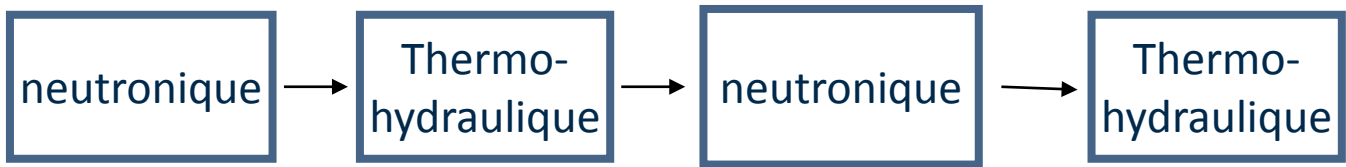
Vers des études orientées « sureté »

suivi précis des températures (combustible, modérateur) en fonction du temps

La neutronique dépend des températures du combustible et du modérateur (effet Doppler, bosse thermique, ...) thermo-hydraulique → neutronique



Les températures dépendent de la distribution de puissance neutronique → thermo-hydraulique



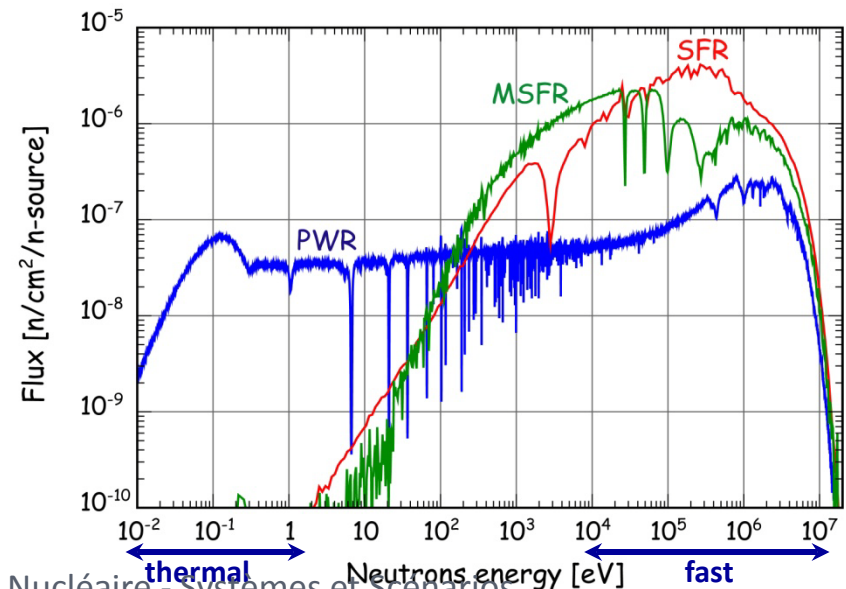
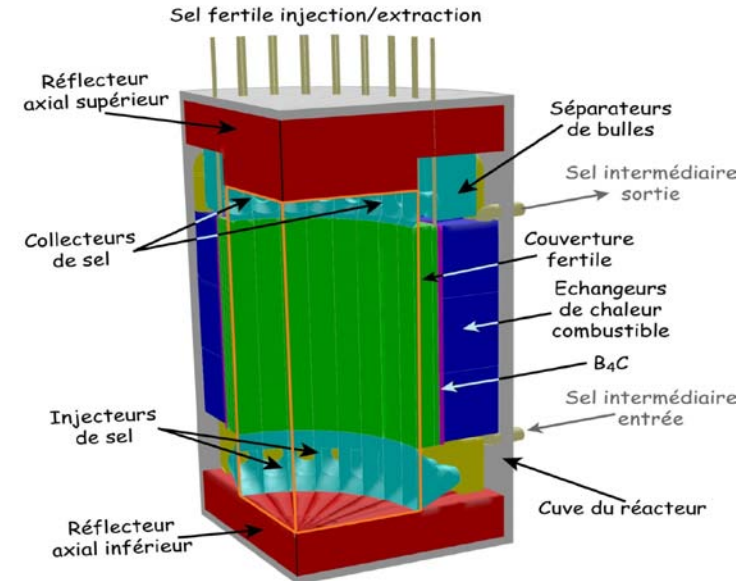
Les réacteurs à sels fondus, concept MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

Système très innovant

- cycle thorium
- combustible liquide, caloporteur
- concept surgénérateur à **neutrons rapides**
- **inventaire de matière fissile <5t/GWe**
(cf 17 t/GWe pour un RNR)
- retraitement en ligne possible (40l/j)
- densité de puissance élevée

Des spécificités intéressantes du point de vue de la sûreté

- combustible liquide, peut être évacué passivement et « étalé »
- très peu de réserve de réactivité

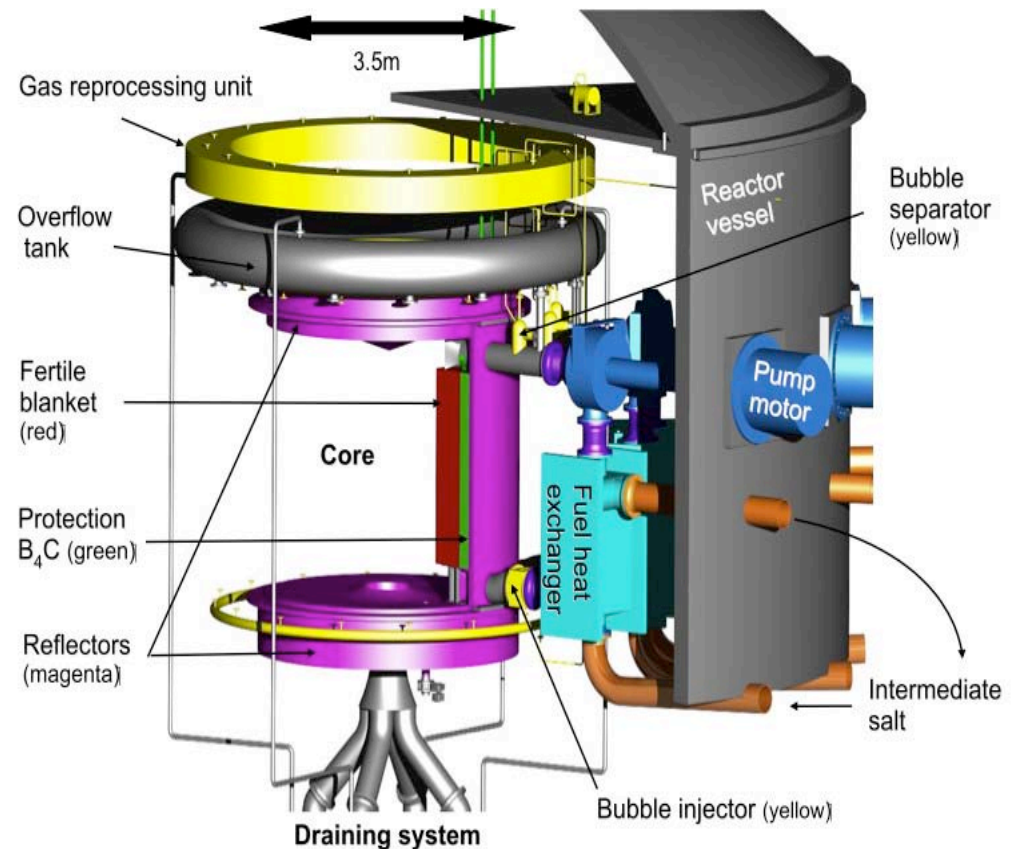


Vers un démonstrateur de réacteur à sels fondus

Programme européen EVOL porté par le CNRS (FP7)
Etudes préliminaires de sûreté

Collaboration IRSN engagée sur la sûreté

Le concept CNRS a été choisi comme concept de référence dans le forum international Gen4



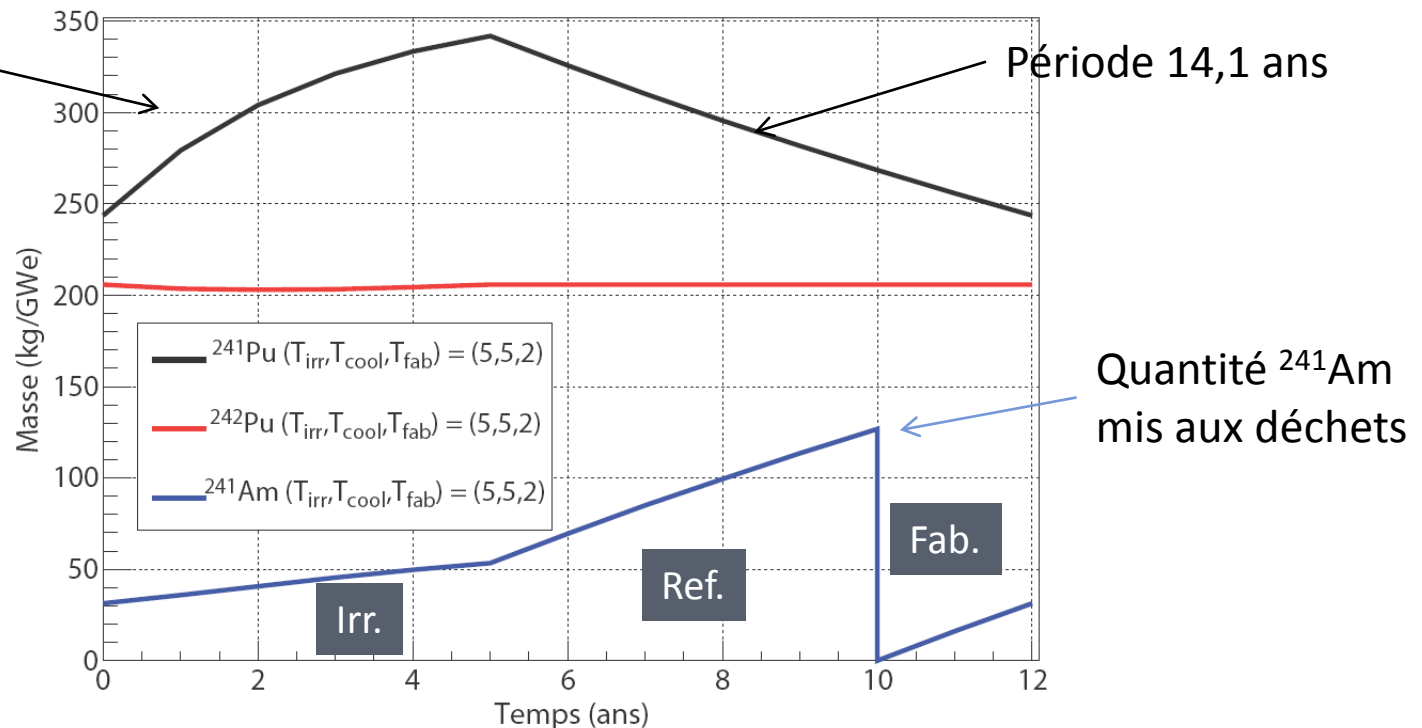
Scénarios : développer un code académique

- souple d'utilisation : qui permet notamment d'introduire facilement différents types de systèmes innovants
- qui prend en compte une évolution complète du combustible : réacteur, refroidissement, fabrication
- Etre capable de quantifier tous les critères d'un scénario

Illustration de la nécessité et de la complexité d'un tel code : multirecyclage du ^{241}Pu

À l'équilibre, pour compenser la décroissance pendant le retraitement du combustible, le ^{241}Pu croît en réacteur

**Donc la réactivité du cœur augmente !
Couplage scénario / neutronique**

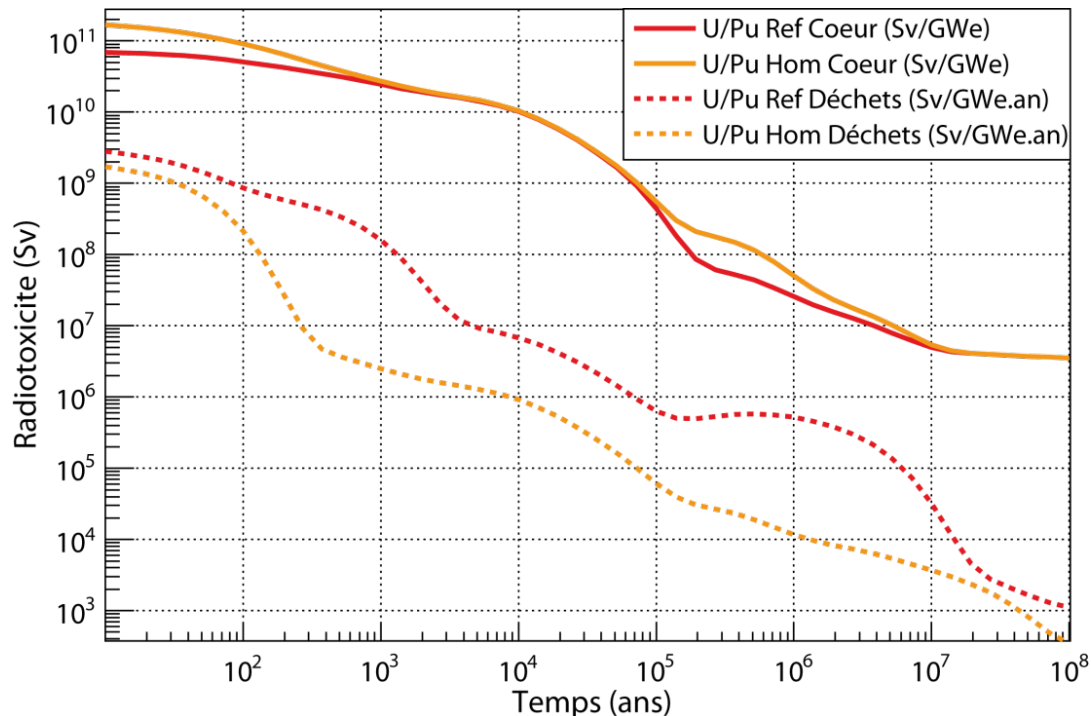


Hors équilibre (transition Gen3 Gen4), c'est encore pire, le temps de refroidissement du Pu est dicté par les hypothèses du scénario, et impacte donc fortement la neutronique

Prospective : étudier des scénarios « fin de jeu »

La plupart des scénarios long terme se focalisent sur les déchets produits annuellement en oubliant l'inventaire en cœur des réacteur qui devient un déchet lorsqu'on arrête la filière

L'inventaire en cœur d'un RNR-Na représente l'équivalent en radiotoxicité de la production cumulée de ses proches déchets pendant des siècles



Etudier en détail des scénarios « fin de jeu » avec incinération des matières fissiles (Pu)

Activités interdisciplinaires

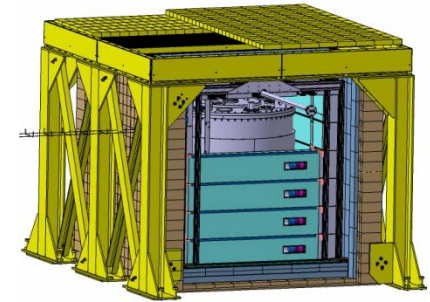
Champs proche

Prolifération : contrôle des réacteurs par détection des neutrinos

Test expérimental de la méthode (NUCIFER)

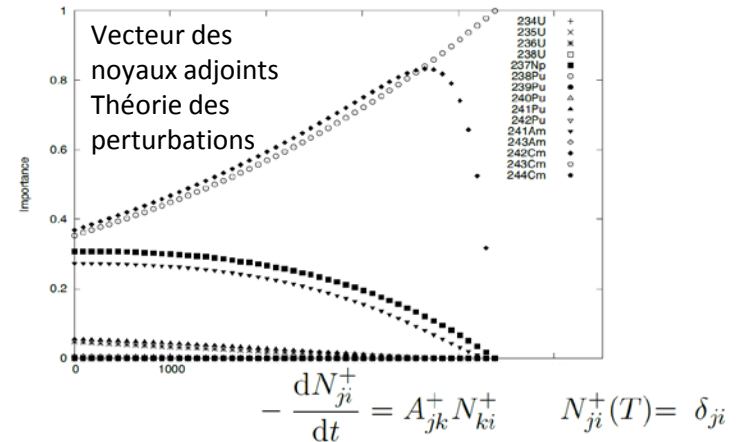
Simulation de « scénarios de détournement » dans le cadre de l'AIEA et de ESARDA (Europe) sur différents systèmes : RNR, PWR, VHTR

à poursuivre



Sensibilité aux données nucléaires

- orienter les mesures microscopiques à effectuer à renforcer
- définir des expériences intégrales à effectuer sur réacteurs maquettes (Masurca?) à développer
- calculer les marges de sûreté des réacteurs



Champs moyen

Lien avec la **radiochimie** :

Réacteur à sels fondus : couplage neutronique / pyrochimie

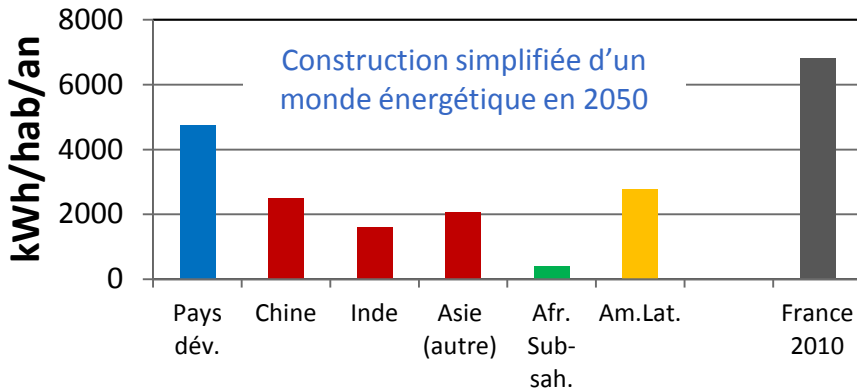
à poursuivre

stratégies de retraitement, séparation des actinides mineurs, matrices de stockage, contrainte matériaux combustibles à développer

Activités interdisciplinaires

Champs lointain

Prospective énergétique à poursuivre



Sociologie : temporalité de la décision (transmutation, régénération, ...) à renforcer

Géographie : catégorisation des matières, atlas des flux des matières, présents, futurs, ... à renforcer

Géologie : ressources en uranium, scénarios de déploiement, ... à renforcer

Intégration des contraintes physiques des RNR-Na dans le code de prospective technico-économique POLES

