

BULLETIN N° 266
ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES



Lundi 3 Avril 2023 (en format mixte présence-distance) :

« Les déchets nucléaires : un panorama »

Conférence du Prof. Bernard BOULLIS

Ancien Directeur des Programmes sur le cycle du combustible au CEA

Notre Prochaine séance aura lieu le lundi 15 Mai 2023 de 15h00 à 18h00
Salle Annexe Amphi Burg
Institut Curie, 12 rue Lhomond – 75005 Paris

Elle sera consacrée, à **15h précises**, au thème suivant :

« L'interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire »

Par notre collègue Anne BURBAN

Membre de l'AEIS

Inspectrice générale honoraire de l'éducation, des sports et de la recherche (groupe de mathématiques)

Personnalité qualifiée au Conseil supérieur des programmes du Ministère de l'Éducation Nationale

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
Siège Social : 5 rue Descartes 75005 Paris
Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

PRÉSIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE-PRÉSIDENTE : Dr Edith PERRIER
VICE PRÉSIDENT BELGIQUE(Liège) : Pr Jean SCHMETS
VICE PRÉSIDENT ITALIE(Rome) : Pr Ernesto DI MAURO
VICE PRÉSIDENT Grèce (Athènes) : Pr Anastassios METAXAS

SECRÉTAIRE GENERAL : Eric CHENIN
SECRÉTAIRE GÉNÉRALE adjointe : Irène HERPE-LITWIN
TRÉSORIÈRE GÉNÉRALE : Françoise DUTHEIL

MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :
 Gilbert BELAUBRE
 Michel GONDRAN

PRÉSIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LÉVY (†)
PRÉSIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIÈRE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Ernesto DI MAURO

CONSEILLERS SPÉCIAUX :
ÉDITION : Pr Robert FRANCK
RELATIONS EUROPÉENNES : Pr Jean SCHMETS
RELATIONS avec AX : Gilbert BELAUBRE
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF : Michel GONDRAN et Jean BERBINAU
MOYENS MULTIMÉDIA et UNIVERSITÉS : Pr Victor MASTRANGELO et Éric CHENIN
RECRUTEMENTS : Pr. Sylvie DERENNE, Pr Anne BURBAN, Pr Jean-Pierre FRANÇOISE, Pr Christian GORINI, Pr Jacques PRINTZ, Jean BERBINAU
SYNTHÈSES SCIENTIFIQUES : Dr Jean-Pierre TREUIL, Marie Françoise PASSINI
MECENAT : Pr Jean Félix DURASTANTI, Jean BERBINAU, Anne BURBAN
GRANDS ORGANISMES DE RECHERCHE NATIONAUX ET INTERNATIONAUX : Pr Michel SPIRO
THÈMES ET PROGRAMMES DE COLLOQUES : Pr Jean SCHMETS et Dr Johanna HENRION-LATCHE

SECTION DE NANCY :
PRÉSIDENT : Pr Pierre NABET
SECTION DE REIMS :
PRÉSIDENTE : Dr Johanna HENRION-LATCHE

Avril 2023

N°266

TABLE DES MATIERES

p. 03 Séance du 3 Avril 2023 : conférence du Prof. Bernard BOULLIS
 p. 08 Conférence du 15 Mai 2023 : résumé de la conférence d'Anne BURBAN
 p. 09 Documents

Prochaine séance : lundi 15 Mai 2023 de 15h00 à 18h00

« L'interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire »

Par notre collègue **Anne BURBAN**

Membre de l'AEIS

Inspectrice générale honoraire de l'éducation, des sports et de la recherche (groupe de mathématiques)

Personnalité qualifiée au Conseil supérieur des programmes du Ministère de l'Éducation Nationale

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
 Siège Social : 5 rue Descartes 75005 Paris
 Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

Séance du Lundi 3 Avril 2023 mixte présence-distance

La séance est ouverte à 15h, sous la Présidence de Victor MASTRANGELO

- **Étaient présents physiquement nos Collègues membres titulaires de Paris** : Gilbert BELAUBRE, Erice CHENIN, Jean-Felix DURASTANTI, Anne BURBAN, Françoise DUTHEIL, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Pr METAXAS (Athènes), Paul-Louis MEUNIER, Denise PUMAIN, René PUMAIN, Jean SCHMETS.
- **Était présent physiquement notre Collègue membre correspondant** : Jacky ROUSSELLE
- **Étaient connectés à distance nos Collègues** : Jean-Louis BOBIN, Jacques FLEURET, Abdel KENOUI, Christian GORINI, Jacques PRINTZ, Enrico SARTORI, Jean-Pierre TREUIL.

Synthèse de la Conférence AEIS du 3 avril 2023, par Jacky Rousselle.

« Les déchets nucléaires : un panorama »

par Bernard BOULLIS

Ancien Directeur des Programmes sur le cycle du combustible au CEA

1) La nature des déchets radioactifs

Les déchets nucléaires de haute activité à vie longue proviennent principalement des produits de fission générés lors des réactions de fission nucléaire. Chaque année en France environ 50 tonnes de produits de fission sont produites, représentant 4% du combustible utilisé. Dans une moindre quantité sont générés par capture de neutron des actinides ou transuraniens qui sont les éléments chimiques de numéro atomique supérieur à celui de l'uranium, représentant 1% du combustible utilisé dont en majorité le plutonium, les autres actinides sont désignés actinides mineurs (Neptunium, Américium, Curium).

Aujourd'hui 10% de l'électricité produite dans le monde est d'origine nucléaire.

Les déchets nucléaires sont générés tout le long du cycle du combustible nucléaire, dans les installations, en amont et en aval du cycle et dans les centrales nucléaires de production.

Les déchets primaires sont ceux déjà mentionnés dans le 1er paragraphe. Leur production au niveau mondial par an se détermine par un facteur 10 sur la production en France, soit la quantité mondiale de 500 tonnes/an.

Les déchets secondaires sont les matériaux ayant été au contact avec les matières radioactives. Leur volume est beaucoup plus important (environ 30.000 tonnes/an en France) et leur activité beaucoup plus faible que la catégorie précédente.

Il convient aussi de distinguer les déchets historiques qui peuvent poser les plus importants problèmes de gestion à traiter à l'avenir. Par exemple les déchets enrobés de bitume, il y en a beaucoup, ils présentent un risque d'incendie. Depuis plusieurs années, il n'y a plus de génération de tels déchets avec bitume.

On distingue aussi les déchets des matières valorisables du combustible usé, par exemple, l'uranium, le plutonium fissile, etc.

La quantité de 30.000 tonnes/an de déchets radioactifs en France est à comparer à celle de déchets dangereux d'au moins 1 million de tonnes/an (33 fois plus), les déchets industriels pour au moins 10 millions tonnes/an (soit 330 fois plus), les déchets ménagers pour la même quantité approximativement et les déchets de construction pour au moins 100 millions tonnes/an (soit 3.300 fois plus) - source ADEME 2018.

Les produits de fission sont à excès de neutrons donc avec une radioactivité bêta moins, et majoritairement des périodes courtes en dessous de 30 ans (sauf par exemple en très petite quantité le technétium 99 qui a une période de 210 000 ans). Plus la période est courte, plus la radioactivité est importante. Les transuraniens ont une radioactivité alpha avec des périodes très longues (exemple la période de 24 000 ans du plutonium 239).

Les déchets sont classés selon leur niveau d'activité et leur période, soit à vie courte (VC) pour une période inférieure à 30 ans, soit à vie longue (VL) pour une période supérieure à 30 ans. De plus, il est considéré qu'au bout d'une durée de 10 périodes, la radioactivité a beaucoup chuté.

On distingue les déchets HA de haute activité ($> 1 \text{ GBq/g}$), les déchets MA de moyenne activité ($> 1 \text{ MBq/g}$), les déchets FA de faible activité ($> 1 \text{ kBq/g}$) et les déchets TFA de très faible activité ($< 100 \text{ Bq/g}$).

Pour les déchets TFA en France on n'a pas de seuil de libération alors que dans de nombreux pays un seuil de libération est défini, ce qui permet d'exclure le déchet comme déchet nucléaire, par exemple en Allemagne. En France l'ASN jusqu'à présent a refusé un tel seuil, craignant une contamination des autres filières de déchets. Par contre, il est visé en France pour ces déchets TFA des filières propres de valorisation, de recyclage dans le secteur nucléaire lui-même. Ceci devrait voir le jour prochainement.

L'ANDRA (Agence Nationale de Gestion des Déchets Radioactifs) est chargé de la gestion des déchets nucléaires en France. D'après l'inventaire national de l'ANDRA à fin 2020, le volume total cumulé à cette date représentait un volume de 1,7 Mm³ dont 1 Mm³ de déchets FAVC, 0,5 Mm³ de déchets TFA et 4.000 m³ de déchets HAVL (+ 100 m³/an) ; et une activité totale de 200 MBq avec une contribution des déchets FA et TFA inférieure à 0,05%.

2) La dangerosité des déchets radioactifs.

L'effet de l'irradiation déposée par les rayonnements se traduit par de l'énergie transférée à de la matière non vivante (mesure en Gray (1 Gy= 1 J/kg) ou de la matière vivante (mesure en sievert (Sv) avec un coefficient multiplicatif par rapport à la mesure en Gray selon la nature du rayonnement).

Sont considérés d'abord les effets déterministes qui sont précoces (apparaissent très vite après l'irradiation) et certains à dose donnée. Plus la dose est élevée plus les dommages sont importants jusqu'à un effet létal qui peut être de 10 Sv. Ainsi, jusqu'à environ 0,5 Sv, il n'y a pas d'effet déterministe. Au-dessus apparaissent des brûlures, chutes de cheveux, altération du sang. L'irradiation annuelle moyenne est de 3 mSv constitué aux 2/3 des rayonnements telluriques et 1/3 des rayonnements par les examens de diagnostics médicaux (radio, scanner,..). Dans les régions granitiques en France le niveau peut monter jusque 4 à 5 mSv et dans le mode jusqu'à environ 40 mSv dans une région d'Inde par exemple.

En second lieu sont considérés les effets stochastiques, qui ne sont pas certains et qui sont différés après l'irradiation. Ces effets sont des augmentations du risque de cancers et de leucémies. La gravité des effets ne dépend pas de la dose. Par contre, plus la dose est élevée, plus la probabilité d'occurrence est forte. En-dessous de 0,1 Sv, il n'a pas été observé de ce type d'effet. Au-dessus de 0,1 Sv, l'augmentation du risque de cancer est linéaire avec la dose et ceci a été étudié sur la population de survivants d'Hiroshima et de Nagasaki. A 1 Sv, le risque est augmenté de 30% par rapport au risque à 0,1 Sv. En-dessous de 0,1 Sv, de manière conservative, la radioprotection en France est basée sur une relation linéaire sans seuil.

Il y a deux types d'exposition aux rayonnements : par l'irradiation externe dont on se protège par des écrans, et la contamination ou irradiation interne du corps par ingestion de matières radioactives.

3) Comment gère-t-on les déchets nucléaires aujourd'hui ?

3 grands principes aujourd'hui :

- Réduire les déchets à la source : recyclage de l'uranium et du plutonium à l'usine de retraitement de la Hague par exemple.
- Attendre par entreposage : décroissance de la radioactivité avec le temps selon la période.
- Confiner : éléments dans matrice, elle-même dans conteneur puis entreposé en surface ou subsurface ou stocké dans couche géologique ;

Dans le projet de stockage CIGEO en particulier des conteneurs HAVL incluant dans une matrice de verre des produits de fission et des actinides mineurs, l'eau serait le vecteur potentiel de dissolution et de transport des éléments. L'argile en profondeur du stockage assure la sûreté à long terme : faible mobilité de l'eau dans l'argile, absorption de certains produits de fission, très faible solubilité des transuraniens. Les estimations d'impact de l'Andra sur les populations ne montrent pas d'impact avant plusieurs centaines de milliers d'années puis un niveau d'environ 1/1000 de la radioactivité naturelle, soit de l'ordre de 1 microsievert.

4) Les questions en suspens.

- Pour les déchets historiques à base de bitume, le nucléaire actuel ne produit plus ce type de déchets.
- Pour les déchets futurs du démantèlement, il nécessite d'organiser leur gestion par les futurs volumes induits.
- Le recyclage par le retraitement du combustible a aussi des limites.
 - Le plutonium retraité est actuellement recyclé dans les assemblages MOX qui produisent 10% de l'électricité nucléaire en France et qui permet d'économiser environ 10% d'uranium.
 - Les réacteurs 'moxés' en France sont les réacteurs les plus vieux donc les réacteurs qui vont s'arrêter les premiers.
 - Les EPR ont été conçus pour recevoir des assemblages MOX et tous les réacteurs intermédiaires ne sont pas actuellement conçus pour en recevoir. Il y a donc des études d'adaptation des tranches concernés en exploitation pour fonctionner avec ces assemblages MOX.
 - Il demeure la question des combustibles MOX usés qui ne sont pas retraités pour la raison qu'ils ne contiennent plus suffisamment d'isotopes fissiles de plutonium. L'ASN demande d'étudier l'éventuel stockage dans CIGEO de ces assemblages MOX usés.
 - Avantage des réacteurs à neutrons rapides : l'uranium 238 se convertit très bien en Plutonium et d'autre part les isotopes du plutonium et les actinides mineurs sont plus fissionnés qu'en spectre thermique. Les réacteurs rapides sont donc l'avenir du nucléaire pour l'utilisation beaucoup plus performante des ressources en uranium.
- Y a-t-il des alternatives au stockage géologique profond ?
 - Les américains développent des projets de 'Deep boreholes' pour stocker des déchets entre 3000 et 5000 m de profondeur.
 - Il y a aussi des projets d'entreposage de (très) longue durée.

- Mais ces projets peuvent aller à l'encontre de l'éthique : "La génération qui profite de l'électricité doit faire ce qu'il faut pour gérer ses déchets".
- Cependant beaucoup de pays sont dans cette situation d'entrepôts 'wait and see'.
- La transmutation d'éléments.
 - Les actinides mineurs ne représentent qu'un millième en masse du combustible usé. Le plutonium représente 1% en masse.
 - Pour retrouver la radioactivité de l'uranium naturel, il faut 250 000 ans à un assemblage usé non retraité. Avec mise en œuvre de la séparation du plutonium et de l'uranium d'une part, et d'autre part les produits de fission et les actinides mineurs, il faut 10 000 ans (cas pour la France à l'usine de la Hague pour ces derniers éléments inclus dans du verre enfermé dans les containers destinés au stockage profond CIGEO). Avec des verres sans actinides mineurs, puisqu'il n'y a que des produits de fission, il faut 300 ans pour que ces verres retrouvent le niveau de radioactivité de l'uranium naturel.
 - A Marcoule, on a entrepris des recherches pour séparer les actinides mineurs depuis environ 30 ans. A présent on saurait faire. Et il faut des machines pour les détruire. Ce sont les réacteurs rapides de 4^{ème} génération, ou bien des installations type ADS (Accelerator Driven System) ou autre machine à transmutation.
 - A Marcoule il a été isolé de l'américium et introduit en expérience dans le réacteur Phénix (irradiation ECRIX). Le taux de fission a été de 30% en 1 an d'irradiation.
 - Mentionnons le projet d'ADS MYRRHA (SCK- CEN) avec une puissance en mode sous-critique de 50 – 100 MWth avec des phases de construction jusque 2035 puis un projet MYRRHA en phase industrielle avec 1 GWth.

5) Quelques conclusions.

- Il y a un consensus international pour déterminer que le stockage géologique semble être la meilleure solution pour assurer le confinement des déchets de haute activité.
- Il existe des options avancées comme la transmutation mais elle nécessite du développement industriel de longue durée (construction de réacteurs rapides, ADS comme MYRRHA, etc..).
- Difficulté intergénérationnelle : Il faut que les générations futures puissent au besoin pouvoir agir sur les solutions mises en œuvre actuellement si elles le souhaitent : réversibilité,..

Questions :

Jean-Félix Durastanti : qu'en est-il de dispositifs lasers ultra-puissants tels que proposés par le professeur Mourou pour traiter des déchets nucléaires.

BB : Il ne faut pas sous-estimer la durée longue des éventuels développements industriels.

Denise Pumain : Que représentent les déchets militaires ?

BB : C'est important dans les déchets historiques. Les MAVL sont importants, les HAVL sont négligeables. Cf inventaire Andra.

René Pumain : Pourquoi Superphénix a-t-il été abandonné ?

BB : Cela a été une décision politique. Frédéric Joliot Curie avait déjà perçu les réacteurs rapides comme des réacteurs de '2^{ème} génération' à l'époque.

Jacky Rousselle : Peut-on aussi transmuter les produits de fission ?

BB : les produits de fission à vie longue sont en très faible quantité. L'enjeu est de séparer les actinides mineurs qui eux sont à vie longue et au besoin les transmuter dans les machines évoquées.

Abdel Kenoufi (à distance) : Comment envisagez-vous la gestion des déchets pour des pays émergents qui veulent se doter du nucléaire civil ?

BB : C'est un problème difficile car il y a une doctrine française qui précise qu'un pays doit s'occuper de ses déchets. Il se développe aujourd'hui des approches régionales sous l'égide de l'AIEA. Ce qui inquiète les pays qui veulent s'équiper en nucléaire, c'est la garantie d'approvisionnement en uranium.

Françoise Dutheil : Que sont les opérations sur le combustible usé menées en Russie ?

BB : En France sur les 1000 t/an retraité, on récupère 940 tonnes d'uranium de retraitement, avec des isotopes de l'uranium U233, U236,.. à périodes plus courtes que celles de U238 ou 235. Les opérations en Russie consistent à enrichir en Uranium 235 cet uranium de retraitement (URT) pour permettre de l'utiliser à nouveau en combustible en réacteur. Ces opérations permettent d'éviter d'introduire ces isotopes de l'uranium dans les usines d'enrichissement telles que George Besse 2 en France. Suite à la guerre en Ukraine avec la Russie, la volonté est à présent de monter en France une telle unité d'enrichissement avec l'URT.

Jean-Louis Bobin : Qu'en est-il des déchets nucléaires d'origine médicale ?

BB : Il y a très peu de Déchets VL. Au contraire dans le domaine médical, on utilise beaucoup d'éléments à vie très courte donc la radioactivité décroît très vite. On n'a pas du tout d'éléments à haute activité tels que les produits de fission.

Participant : qu'en est-il des déchets qui ont été immergés dans les océans.

BB : Ce ne sont pas des déchets de haute activité.

Gilbert Belaubre : Utilisation des volcans pour la gestion des déchets nucléaires.

BB : Il y a eu des idées soit mettre sous terre dans des zones de subduction ou sous les océans. Il a été envisagé d'envoyer dans l'espace. Aujourd'hui la doctrine c'est que vous n'avez pas le droit de vous implanter ailleurs que dans vos limites territoriales.

C'est la sacralisation de tous les biens communs.

L'enregistrement intégral de présentation du conférencier, de la conférence, et des échanges qui ont suivi, est disponible sur le site de l'AEIS dans la rubrique des comptes-rendus des conférences mensuelles.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement M. Yann TRAN et Mme Annabelle POIRIER de l'Institut Curie pour la qualité de leur accueil.

Conférence du 15 Mai :

« L'interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire »

Par notre collègue Anne BURBAN :

- *Inspectrice générale honoraire de l'éducation, des sports et de la recherche (groupe de mathématiques)*
- *Personnalité qualifiée au Conseil supérieur des programmes du Ministère de l'Éducation Nationale*

Résumé :

La teneur de la présentation du 15 mai 2023 diffère de celle des conférences habituellement dispensées lors des réunions de l'AEIS. En effet, son objet n'est pas de nature scientifique, mais pédagogique ; il s'agit de présenter la prise en compte de l'interdisciplinarité dans l'enseignement des sciences à l'École (de l'école élémentaire aux classes préparatoires). Différents dispositifs interdisciplinaires sont décrits en termes de contenus, de modalités pédagogiques et d'organisation. Les enjeux qu'ils constituent pour la formation des élèves sont mis en lumière, mais aussi les difficultés de mise en œuvre qu'ils connaissent, les questions qu'ils soulèvent en matière de formation des enseignants et les risques qu'ils peuvent comporter pour une discipline comme les mathématiques. Une focale particulière est portée sur deux dispositifs interdisciplinaires : l'enseignement scientifique au cycle terminal du lycée général, mis en place en 2020 et dont le programme a été revu en 2023 et les TIPE en classes préparatoires, qui perdurent depuis 1995.

Quelques éléments du CV d'Anne BURBAN :

Agrégation de mathématiques (1976)

DEA de mécanique théorique (Paris VI, 1977)

Professeur de mathématiques en classes préparatoires de 1976 à 2008 :
prépa HEC, prépa agro-véto, prépa MP* au lycée Stanislas de Paris).

Inspectrice générale de l'éducation nationale de 2008 à 2020.

Depuis janvier 2021, personnalité qualifiée au Conseil supérieur des programmes, instance notamment chargée de piloter la rédaction des programmes scolaires et de les soumettre au ministre de l'Éducation nationale et de la Jeunesse.

Officier dans l'ordre des Palmes académiques Officier dans l'Ordre National du mérite
Chevalier de la Légion d'Honneur

Documents

Pour préparer la conférence de notre collègue Anne BURBAN, nous vous proposons ci-après l'article suivant, rédigé par la conférencière en support de sa conférence, article librement téléchargeable et *disponible sur le site de l'AEIS* :

« *L'interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire* »

Pour compléter le panorama sur les déchets de Bernard Boullis, nous vous proposons aussi un article sur le même sujet publié dans une revue à comité de lecture. Il donne un panorama vu de l'OCDE, au niveau des données nucléaires qui sont nécessaires pour les codes de simulation et de gestion des déchets nucléaires. Cet article est proposé par notre collègue Enrico Sartori, qui a été responsable de la bibliothèque centrale des codes nucléaires de l'OCDE. L'article est librement téléchargeable et *disponible sur le site de l'AEIS* :

« *Nuclear data for radioactive waste management* », par Enrico Sartori, dans Annals of Nuclear Energy, 2013.

L'interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire

Une source d'enrichissement indéniable, mais dont la mise en œuvre soulève des questions vives, d'ordres pédagogique et organisationnel.

La teneur de cette présentation diffère de celles qui se sont déjà tenues sur le thème de l'interdisciplinarité dans les sciences et de sa capacité à faire face aux grands défis d'aujourd'hui et de demain.

En effet, son contenu ne porte pas sur des considérations de nature scientifique, mais sur les aspects pédagogiques et didactiques liés à la mise en œuvre, au sein des classes (de l'école élémentaire aux classes préparatoires), de l'interdisciplinarité dans les sciences.

Le regard que je porte sur ce sujet est soutenu par la vision que j'ai pu acquérir au cours de mon activité professionnelle, d'abord comme professeur de mathématiques en classes préparatoires, puis comme inspectrice générale, vision dont la perspective a été légèrement déplacée par mon expérience actuelle de membre du Conseil supérieur des programmes, instance chargée de superviser l'écriture des programmes scolaires, et d'émettre des avis et des propositions à destination du ministre de l'Éducation nationale et de la Jeunesse.

Après avoir dressé un panorama historique de l'évolution des savoirs scolaires, en lien avec celle des savoirs savants, je présenterai un argumentaire en faveur de la prise en compte de l'interdisciplinarité dans l'enseignement des sciences, j'en expliciterai les modalités de mise en œuvre, sans omettre de spécifier ses limites, ses faiblesses et ses risques éventuels.

Du savant généraliste à la fragmentation disciplinaire

Lorsque notre ancêtre *Homo habilis*, il y a quelques 2 millions d'années, taillait les premiers outils, il devait certes avoir quelques savoirs (il lui fallait reconnaître le bon galet) et quelques savoir-faire (il devait le tailler correctement), mais il est probable qu'il ne s'est jamais demandé si son art relevait de la géologie, de la géométrie ou de la technologie.

Au IV^{ème} siècle avant notre ère, Aristote était tout à la fois philosophe, scientifique, poète, mathématicien, homme politique. Il était savant, voilà tout.

Au XVIII^{ème} siècle, Diderot et d'Alembert ne savaient sans doute pas tout, mais ils pouvaient envisager comme possible de concevoir un ouvrage rassemblant le savoir humain. Certes des rubriques apparaissent dans ce savoir maintenant vaste, mais l'honnête homme peut encore rêver de les fréquenter toutes.

Ce n'est qu'aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles que les savoirs se morcelèrent en disciplines toujours plus précises, toujours plus nombreuses, leur nombre augmentant par scissiparité. En même temps, l'ambition scientifique de chaque homme se limite et cela semble

inévitable : devenir expert dans un champ de savoir exige, de plus en plus, que l'on se spécialise et donc que l'on abandonne d'autres domaines. Les disciplines savantes se multiplient. Les frontières se dressent, qui protègent des territoires et leurs habitants.

L'école suit, à sa manière, cette fragmentation tant dans l'organisation de ses enseignements que dans la spécialisation de ses professeurs.

Les premiers agrégés apparaissent en 1766 pour remplacer les professeurs jésuites expulsés par Louis XV. Ils ne sont pas spécialisés. En 1821, trois spécialités sont mises au concours : lettres, grammaire et sciences. L'agrégation de philosophie naît en 1828, celle d'histoire en 1830. En 1841, l'agrégation de sciences se scinde en agrégation de mathématiques d'une part et agrégation des sciences physiques et naturelles d'autre part. Les sciences naturelles se séparent des sciences physiques en 1881 et l'histoire abandonne la géographie en 1944. Le besoin de compétence scientifique du professeur s'exprime par sa spécialisation disciplinaire. Un lien fort s'affirme alors entre compétence et spécialisation ; ce lien persiste, et est l'une des causes de certaines résistances à la mise en place de l'interdisciplinarité.

La fragmentation des disciplines scolaires n'est donc pas un caprice infondé, elle est la conséquence de l'augmentation du volume des savoirs et de la nécessité de se spécialiser pour devenir compétent et pour avoir la légitimité de transmettre des connaissances.

L'interdisciplinarité, tendance de la vie intellectuelle depuis un demi-siècle

Rappelons tout d'abord un exemple emblématique en matière d'interdisciplinarité : le 25 avril 1953, la revue *Nature* publie un article majeur pour l'histoire de la biologie. D'à peine une page, signé de James Watson et Francis Crick, il contient une description d'une structure possible pour la molécule d'ADN. Voici donc deux biologistes, qui signent, pourrait-on dire l'acte de naissance d'une nouvelle discipline, la génétique moléculaire, et qui pour cela publient un article de chimie (une structure moléculaire) établi à partir de travaux de physique (la diffraction des rayons X par des cristaux) menés par Rosalind Franklin, qui n'est d'ailleurs même pas citée dans l'article...

Dans la sciences savante, les relations entre disciplines sont parfois difficiles et l'interdisciplinarité ne s'installe pas sans violence. Quoi il en soit, on voit ici un exemple de collaboration de regards disciplinaires qui fait progresser le savoir. Et cette collaboration aboutit à la naissance d'une nouvelle discipline, la biologie moléculaire. Comme on le voit, en matière de recherche, l'interdisciplinarité, souvent, ne fait pas disparaître les disciplines, mais les multiplie.

Dans le domaine des sciences, mais aussi dans ceux de l'art, de la littérature et de la philosophie, la vie intellectuelle, depuis le milieu du XX^e siècle, pousse à interroger les cloisonnements disciplinaires, parfois même à remettre en cause leur légitimité. Parmi les intellectuels dont la pensée a inspiré le développement de l'interdisciplinaires dans le monde scolaire, on peut citer Edgar Morin et Michel Serres.

Edgar Morin associe la nécessité de l'interdisciplinarité à la complexité du réel. Si le réel est complexe, c'est qu'il est multifactoriel. Aucune discipline ne saurait, à elle seule, rendre compte de cette complexité, seule le peut une coopération d'approches convergentes. Si les disciplines sont indispensables pour explorer chacune en profondeur une dimension

particulière du réel, l'appréhension de ce dernier dans son ensemble exige l'interdisciplinarité.

Quant à Michel Serres, il fait dans *Le Tiers-instruit* l'éloge de l'interdisciplinarité comme manière de sortir de soi-même, de rompre avec ses confortables habitudes. Lorsqu'on est confortablement installé dans ses savoirs familiers, sa discipline, on évolue peu ; l'enrichissement survient lorsque l'on quitte ce cocon.

C'est le sens de la phrase « *Certes, je n'ai rien appris que je ne sois parti, ni enseigné autrui sans l'inviter à quitter son nid.* », extraite du *Tiers-instruit*. L'interdisciplinarité est alors un moteur de développement personnel et de progrès professionnel.

Comment traduire ces considérations intellectuelles en termes pédagogiques ? Est-il possible de trouver, dans la classe, des vertus à l'interdisciplinarité qui traduiraient le rôle qu'elle joue dans la production de savoirs modernes et dans le développement de nouvelles compétences, tant pour les professeurs que pour les élèves ?

Les arguments en faveur de l'enseignement de l'interdisciplinarité

Loin d'être un appauvrissement, une perte d'expertise, la pratique de l'interdisciplinarité doit être considérée comme l'exploration de nouveaux territoires à l'interface des disciplines, la mise en commun et la confrontation féconde d'approches différentes. Ainsi, pratiquer l'interdisciplinarité change le regard sur les savoirs unitaires. En considérant un même objet sous plusieurs angles, on en perçoit mieux le volume et les contours. L'interdisciplinarité est à la pédagogie ce que la vision binoculaire, en relief, est à la perception du monde. L'interdisciplinarité permet en effet de mettre les savoirs en perspective les uns par rapport aux autres, de comprendre la complémentarité des approches et leur nécessaire mise en synergie pour relever les défis du monde actuel et de celui à venir.

Car pratiquer l'interdisciplinarité permet aussi de rapprocher les thématiques abordées à l'école de la complexité du réel. Étant un passage obligé pour dépasser les conditions « simplifiantes » d'acquisition du savoir, c'est un moyen de faire rentrer l'école dans la vraie vie. C'est vrai dans de nombreux domaines, mais cela l'est tout particulièrement lorsque l'on aborde des questions « socialement vives » comme la santé, le climat, l'énergie et, plus généralement, le développement durable.

Enfin, et ce n'est pas le moindre argument en sa faveur, pratiquer l'interdisciplinarité, c'est permettre aux enseignants de prendre conscience des difficultés qui se posent aux élèves confrontés à la multiplicité des approches, par exemple à la polysémie du vocabulaire employé dans chaque discipline. Lorsqu'on parle d'argumentation, parle-t-on de la même chose en sciences et en histoire ? Le sens du mot *hypothèse* est-il le même en mathématiques et en biologie ? La preuve a-t-elle le même statut en mathématiques et dans les sciences expérimentales ? Prendre conscience de ces difficultés permet, soit de les effacer lorsqu'une harmonisation est possible, soit de les assumer consciemment quand c'est la seule solution. On aura beau faire, le mot *milieu* n'aura jamais le même sens en mathématiques et en biologie, voire en littérature policière...

Enfin, pratiquer l'interdisciplinarité, c'est organiser une relation aux savoirs qui est celle qui sous-tend la construction des savoirs modernes ; c'est donc ainsi préparer les élèves à être plus tard, au moins pour certains d'entre eux, des acteurs de l'accroissement du savoir humain.

La mise en œuvre opérationnelle

Concrètement, la mise en œuvre de l'interdisciplinarité dans l'enseignement s'effectue selon deux modalités :

- par les liens entre les disciplines, systématiquement mentionnés dans les programmes scolaires (c'est le cas, par exemple, des statistiques entre mathématiques, physique, biologie, économie ou encore de la programmation informatique entre mathématiques et technologie au collège) ;
- mais l'interdisciplinarité a fait son entrée dans l'École en tant que dispositif institué (avec un programme, un horaire dédié et une évaluation aux examens) dans les années 2000 : tout d'abord à travers l'introduction des travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE) dans les classes préparatoires scientifiques en 1995, puis au niveau pré-bac avec l'introduction des travaux personnels encadrés (TPE) en première et en terminale et les itinéraires de découvertes (IDD) au collège.

Analyser les réussites (comme celle des TIPE) et les échecs (comme celui des IDD) de ces dispositifs et les confronter aux réflexions conceptuelles permet d'identifier les grandes questions que pose l'enseignement de l'interdisciplinarité.

- La question de l'expertise enseignante

Elle est essentielle pour au moins deux raisons : seuls des professeurs compétents réussissent leur enseignement et ce n'est qu'à la condition qu'ils sentent leur compétence sollicitée que les professeurs s'engagent dans la pratique de l'interdisciplinarité. Il convient donc qu'ils soient convaincus que, pour pratiquer l'interdisciplinarité, il ne faut pas être moins formé qu'un spécialiste, il faut déjà être un spécialiste très expert de sa discipline, et se former en plus pour pouvoir enseigner au-delà.

Ce dont les professeurs ont besoin, c'est, au sens strict du terme, de développement professionnel. La formation, souvent mono-disciplinaire qu'ils ont reçue leur a donné une forme, une enveloppe. Il leur est ici demandé de sortir de cette enveloppe disciplinaire, de se développer. Certes, cela confère une certaine noblesse intellectuelle à la pratique interdisciplinaire, mais cela crée aussi des devoirs à l'institution, notamment au niveau de la formation (initiale et continue) des enseignants et de leur accompagnement.

- La question de la prise en charge individuelle ou collective

Deux modalités existent, qui présentent chacune leurs caractéristiques propres.

1 – Un seul professeur porte l'approche interdisciplinaire

C'est ce qui a été expérimenté par le ministère en classe de 6^e, à partir de 2006, dans un l'enseignement intégré de sciences et technologie (EIST), avec l'appui de l'Académie des sciences. Mais cette expérimentation s'est avérée être un échec et a conduit à l'abandon

de cet enseignement intégré, alors même que le programme de sciences du cycle 3 (CM1-CM2-6^e) est commun aux trois disciplines impliquées (physique-chimie/SVT/technologie).

2 – Plusieurs professeurs interviennent dans la démarche.

C'est la logique des anciens *thèmes de convergence* au collège, des anciens *TPE* en lycée, et de l'actuel *enseignement scientifique* au lycée. Plusieurs regards, identifiables, sont présentés aux élèves sur des thématiques transversales. Concernant *l'enseignement scientifique*, on peut citer, parmi les thématiques transversales des programmes, l'âge de la Terre, l'évolution démographique, les sons et l'audition, le futur des énergies ou l'histoire du vivant.

L'important est alors que les élèves soient pleinement conscients de la complémentarité, mais aussi de la convergence des regards, qu'ils soient simultanés ou non.

Le succès de ces interventions à plusieurs voix autour d'un même thème est relativement mitigé, comme en témoignent le détachement des mathématiques de l'enseignement scientifique commun en classe de première et la création, à la rentrée 2023, d'un enseignement de mathématiques spécifique dit du *tronc commun* qui a fait récemment beaucoup de bruit. Les difficultés particulières de l'intégration des mathématiques dans ces dispositifs interdisciplinaires au niveau pré-bac sont analysées ci-dessous.

- La relation aux enseignements disciplinaires et le cas particulier des mathématiques

Les liens entre les dispositifs interdisciplinaires et les disciplines peuvent s'exprimer de plusieurs manières :

1 – L'interdisciplinarité comme moyen de traiter les programmes propres aux disciplines

Certaines parties de certains programmes disciplinaires peuvent se prêter à une approche interdisciplinaire. Le programme de sciences et technologie du cycle 3 (CM1-CM2, 6^e) a été écrit dans cet esprit, à travers le traitement de thèmes transversaux : *matière, mouvement, énergie, information ; le vivant ; les objets techniques au cœur de la société, la Terre.*

Il importe cependant d'insister sur le fait que l'utilisation, par une discipline « extérieure » d'une notion intrinsèquement liée à une autre discipline ne permet pas, en général, d'aborder tous les contours de son champ conceptuel. À titre d'exemple, si le concept de la proportionnalité peut être mis en pratique en physique, en biologie ou en géographie, sa bonne assimilation suppose, au-delà d'utilisations contextualisées, une exposition à :

- un vaste ensemble de situations, d'origines très variées (prix à l'unité, recettes de cuisine, déplacements à vitesse constante, pourcentages, agrandissements-réductions, échelles, situations géométriques relevant du théorème de Thalès, des triangles semblables, des homothéties, etc.) ;
- l'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationnalité du concept (passage à l'unité, propriétés de linéarité, coefficient de proportionnalité) ;
- l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept (les tableaux de proportionnalité, la règle de trois, les fonctions linéaires et leur représentation graphique).

La présentation de ces éléments dont beaucoup sont liés aux mathématiques, peut difficilement être externalisée sur le seul traitement d'une situation interdisciplinaire, surtout si elle est enseignée par un professeur d'une discipline autre que les mathématiques.

En revanche, d'autres thèmes des programmes de mathématiques du collège et du lycée, que ce soient les grandeurs et les mesures, les statistiques, l'algorithmique et la programmation, sont des supports de choix à une approche interdisciplinaire à travers la mise en place de projets liés à des questions socialement vives (santé, sécurité, climat), dans lesquels les mathématiques s'intègrent aux autres disciplines, au lieu de s'y juxtaposer.

2 – L'interdisciplinarité pour prolonger les programmes

Il s'agit alors de s'appuyer sur les acquis disciplinaires pour identifier un projet commun qui pourra être traité en interdisciplinarité. L'interdisciplinarité devient alors l'espace privilégié pour la pédagogie de projet dans son sens général, le travail collaboratif et le développement de compétences transversales (les *soft skills* anglo-saxons).

C'était notamment l'un des objectifs des EPI enseignements pratiques interdisciplinaires (EPI) instaurés au cycle 4 (5^e, 4^e, 3^e) lors de la réforme de la scolarité obligatoire de 2016, et fortement réduits à la suite de l'alternance politique de 2017.

Signalons que la mise en place de tous les projets pédagogiques engage alors l'organisation de l'établissement, celle de l'emploi du temps des élèves, mais surtout des services des enseignants en raison des besoins de concertation qu'ils nécessitent.

3 – Le risque d'instrumentalisation et de contextualisation des mathématiques

L'un des griefs portés par les professeurs de mathématiques contre les dispositifs interdisciplinaires repose sur le fait que leur contribution se limite souvent à fournir des outils (la proportionnalité, les statistiques, les probabilités, les représentations graphiques, etc.), en réponse aux besoins ponctuels d'autres disciplines.

Il faut dire qu'au niveau scolaire, le rôle des mathématiques dans la modélisation de phénomènes naturels ou techniques est extrêmement limité, en raison de la faiblesse des outils de modélisation connus des élèves : jusqu'en terminale, les seules fonctions étudiées ne dépendent que d'une seule variable et le champ des équations différentielles est réduit à celles du type $y'=ay$. Cet aspect limitatif est beaucoup moins prégnant au niveau des classes préparatoires, ce qui est sans doute l'une des explications du succès des TIPE, contrairement à tous les dispositifs interdisciplinaires expérimentés, puis modifiés ou abandonnés au niveau pré-bac. La réussite de l'interdisciplinarité suppose en effet un équilibre entre les contributions des différentes disciplines impliquées. Et l'intérêt de la contribution des mathématiques repose en grande partie sur leur capacité à modéliser le réel, à condition toutefois que les élèves disposent des outils permettant de le faire.

Un autre risque concernant l'apprentissage des mathématiques à travers une situation interdisciplinaire repose sur la difficulté, pour certains élèves, de se détacher du contexte spécifique à la situation étudiée, et donc de ne pas accéder à la généralité de la notion mathématique sous-jacente, indépendante du contexte qui a permis de l'aborder.

Cet faute de temps, ce nécessaire travail de décontextualisation-recontextualisation ne peut être pris en charge dans le cadre de l'interdisciplinarité.

- La question du temps

C'est l'un des obstacles souvent mis en avant : l'interdisciplinarité prend beaucoup de temps, même si cette affirmation peut être nuancée.

L'état d'esprit interdisciplinaire est parfois simple affaire de présentation : il peut se limiter à un effort de prise en charge de la polysémie et à une explicitation des croisements de regards. Un projet interdisciplinaire très riche peut aussi se dérouler sur quelques heures à peine s'il ne concerne qu'un chapitre de physique et un de biologie, ou encore un moment d'histoire des sciences (par exemple, la mesure du méridien terrestre par Delambre et Méchain, au programme de l'enseignement scientifique de première, ou l'étude du modèle démographique de Malthus, au programme de celui de terminale). Il ne faut pas laisser croire que seuls les projets gigantesques ont du sens.

- La question de la formation et de l'accompagnement des enseignants

La réussite d'un enseignement se mesure à la qualité des apprentissages qu'il engendre auprès des élèves.

La mise en place d'un dispositif interdisciplinaire suppose un investissement important de la part de professeurs auquel leur formation initiale, essentiellement monodisciplinaire, ne les a pas préparés. Pour les aider, l'institution a toujours assuré des formations (nationales ou académiques) lors de la mise en place des dispositifs (les EPI au collège en 2016, l'enseignement scientifique au lycée en 2019) et des actions à plus long terme sont menées dans les *maisons des sciences* ou au sein des instituts de recherche sur l'enseignement des mathématiques (IREM). Cependant, le suivi de ces formations n'étant ni obligatoire ni toujours reconnu par l'institution, elles ne concernent souvent que des enseignants militants et convaincus plutôt que d'attirer ceux qui en auraient le plus besoin.

De même, de nombreuses ressources (documents d'accompagnement des programmes) sont disponibles sur le site institutionnel *Éduscol*, mais le suivi des connexions à ce site et les visites des inspecteurs montrent que leur consultation n'atteint pas le niveau espéré.

La création de licences et maîtrises bi-disciplinaires et l'évaluation des candidats aux concours de recrutement dans deux disciplines scientifiques (maths/physique-chimie, maths/info, physique-chimie/SVT, maths/SVT) permettraient sans doute d'assurer une meilleure formation initiale à l'interdisciplinarité, mais elles ne semblent pas être à l'ordre du jour, alors que le système éducatif pâtit fortement du défaut d'attractivité du métier d'enseignant et la de baisse du niveau des candidats aux concours de recrutement.

En guise de conclusion

Il n'est pas difficile de s'accorder sur l'intérêt global d'approches interdisciplinaires dans l'enseignement scolaire. Mais c'est loin d'être suffisant pour réussir leur mise en œuvre concrète et améliorer les apprentissages des élèves. Les questions suscitées méritent d'être posées à tous les niveaux : au niveau de l'engagement individuel des enseignants qui doivent sortir de leur zone de confort disciplinaire, au niveau des établissements qui doivent s'organiser pour la mise en place de projets pédagogiques d'un type nouveau, et

au niveau de l'institution, responsable de la formation, du recrutement et de l'accompagnement de ses personnels.

Anne Burban

Inspectrice générale honoraire de l'éducation des sports et de la recherche (groupe de mathématiques)

Personnalité qualifiée au Conseil supérieur des programmes

Contents lists available at [SciVerse ScienceDirect](#)

Annals of Nuclear Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/anucene

Nuclear data for radioactive waste management

Enrico Sartori

Consultant, Retired from OECD/NEA 15 rue Georges Pitard, 75015 Paris, France

ARTICLE INFO

Article history:
Available online xxxxx

Keywords:
Nuclear data
Radioactive waste
Spent fuel

ABSTRACT

The role nuclear data plays in determining the source term of radiation emitted by spent fuel and radioactive waste arising from nuclear activities is described. The isotopes most contributing to this source for different fuel cycles are identified. Current international activities aiming at improving the existing data bases, in particular as concerns data uncertainties are addressed.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Nuclear waste management is a multi-disciplinary activity involving the full fuel cycle, from mining of fissionable minerals to final disposal of spent fuel or residual radioactive materials. It concerns diverse activities such as conversion of mass to different energy forms, for example electricity and heat, or the production of radioactive sources for medical, biological, materials applications, and irradiations (diagnostics, therapy, sterilization, etc.). The term nuclear waste is ambiguous: its meaning depends on ideological viewpoints – what for some is waste is for others a resource, in particular what concerns spent nuclear fuel. Most current fuel cycles exploit the energy potential of the order of a few percents only, the rest is often classified as waste although it still has a high energetic potential. It is a by-product of energy production/conversion both in fission and fusion systems, in medical and different industrial applications.

Nuclear waste needs to be disposed of in ways that ensure safe isolation from the contact with the biosphere for periods long enough to have it decayed to reach negligible effects on biological systems. Several paths are available, depending on policies in use in the different countries: it can go from direct disposal into deep geological repositories, transmutation through single or multiple recycling of spent fuel in closed fuel cycles and transmutation through specifically designed facilities such as accelerator driven systems (ADS). Final geological disposal will always be required; different fuel cycle options aim at the overall reduction of the amount to be stored away from the biosphere.

Waste management activities have to follow strict licensing procedures, all of which require predictive modelling of the performance of the system to ensure compliance with current regulation. Such models are based on algorithms describing the various phys-

ical and chemical phenomena occurring in the different processes, covering in some cases very long times into the future.

Human build predictive models are approximations that consider only the most relevant aspects for a given objective. In addition, waste management modelling involves multi-physics and multi-scales: it implicates diverse disciplines such as rock mechanics, fluid flow in the aquifer, heat transfer, chemical thermodynamics, nuclear and radiation physics, nuclear heat and decay, dosimetry, surface transportation as well as atmospheric transportation and a full modelling may even consider climate change such as future glaciations in the area of the final repository.

In all this, the most important component is the radiation source. The radioactive source of the waste has to be characterised with good precision, as its quantity will affect the modelling results throughout. In our practical applications the source is human made and therefore its characterisation is possible with relatively small uncertainty. Other parameters of a waste management system may have relatively high uncertainties, especially those concerning parts that are not human made: e.g. characterisation of the underground rocks, speed of flow of the aquifer, etc. In these cases the term variability rather than uncertainty is often used.

In order to quantify the source term, both measurements and predictive modelling are used. When modelling is carried out for practical applications, normally macroscopic phenomena are predicted that concern a full system or part of it (e.g. waste repository). In order to predict macroscopic phenomena there is a need to take into account the underlying microscopic phenomena that together result in macroscopic effects. The equations that predict such macroscopic phenomena are for instance the Boltzmann or transport equation in the case of radiation; the microscopic phenomena are in this case described by the nuclear data (cross-sections, decay-constants, yields, etc.).

The nuclear data themselves are derived through an evaluation process involving differential measurements of basic particle interaction processes and theory (Schrödinger or Dirac equations, sta-

E-mail address: esartori@noos.fr

tistical models, pre-equilibrium and intra-nuclear cascade models). At each scale, different physical equations dominate the behaviour; in this case at microscopic level e.g. the Schrödinger equation, at macroscopic level the Boltzmann equation. These equations describe the average behaviour of a population of particles and it is assumed that the average, or expectation value, is the most significant value to describe the population. This is not generally true, only when the distributions of values follow a Gaussian or normal distribution. Gaussian distributions have nothing to do with physics, they are derived from statistics through the central limit theorem or in information theory, by assuming a distribution with the highest entropy or with minimal information. This is a very widely used (and sometimes abused) distribution as it is very convenient and requires only carrying along a minimal amount of information in the uncertainty propagation of different modelling parameters. In a general waste repository system simulation procedure, many parameters used cannot be assumed as having normal distributions. For such parameters specific uncertainty analysis methods are required. As to the basic nuclear cross-section data, we assume that a normal distribution of their values is justified and that the first (average) and second moment of the distributions (standard deviations and correlations) are adequate for our practical purposes.

Nuclear waste management involves many different technical questions, but above all the most difficult aspect concerns public opinion, acceptance, siting, planning and overseeing the implementation of repositories.

This article is an overview of the nuclear data required to correctly predicting the source term of radioactive wastes, the radiation doses in the different activities of manufacturing, production, handling, transport, recycling, transmuting, and storing of radioactive/or fissionable materials. It is based on information generally available to the public.

2. Nuclear data

Nuclear data have been developed to take care of the microscopic phenomena of the multi-scale features of radiation interaction and transport. This removes the need to solve for each interaction the equations at the microscopic level (i.e. Schrödinger equation, etc.) and to concentrate on the interaction with engineering sized materials. This methodology was developed in the early days of nuclear physics, when computers were very slow and had only small storage capabilities compared to today. Modern simulation codes covering a wide range of interaction energy use a hybrid

system: for very high particle energies cross-sections are computed on the fly using approximate nuclear models and for the lower energy part (normally below the threshold of pion emissions ($\pi^{0,\pm}$ - ≈ 150 MeV)) cross-section libraries are used. This is particularly the case for energies below 20 MeV. At lower energies the cross sections cover the unresolved and resolved resonance energy and thermal range, for which nuclear models are not capable of predicting cross-section values, but where these must be derived essentially from experimental measurement and interpolated with the theories of resonances.

A typical procedure for nuclear data evaluation is shown in Fig. 1:

Figs. 2 and 3 show for the most important plutonium isotopes both the evaluated neutron capture and the neutron induced fission cross-sections, both producing other radioactive isotopes. The different energy regions, requiring different methods in evaluating and interpolating data are shown. For isotopes most important for applications such data are derived from relative measurements and through interpretation from resonance theory (Hwang, 2010). In the higher energy part, called also the continuum, cross-sections display a rather smooth behaviour as a function of energy. That part is also based on experimental values and their interpretation through nuclear models (Index of Nuclear Models Computer Programs, <http://www.oecd-nea.org/dbprog/nucmod.htm>). If appropriately processed, they form the input data to computations for a wide variety of nuclear science and technology applications and source term estimation for waste management in particular.

Nuclear data and other basic data used for taking care of the microscopic phenomena in the modelling come as a rule in the form of a data library and are just one component of the overall simulation system. Fig. 4 shows the interaction of the different components in a process of simulation as well as verification and validation (V&V) of the whole system including the mechanism leading to model and data improvement.

Since about half a century a series of sets of basic nuclear data have been developed, available worldwide for the benefit of research, academia and industry, namely the following:

- **CINDA**, bibliographic information about nuclear experimental data, <http://www.oecd-nea.org/cinda/cindaora.cgi>.
- **EXFOR**, Experimental nuclear reaction data, <http://www.oecd-nea.org/dbdata/x4/>.
- **ENSDF**, evaluated nuclear structure data, <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
- **AMC**, Atomic mass evaluation, <http://ribll.impcas.ac.cn/ame/>.

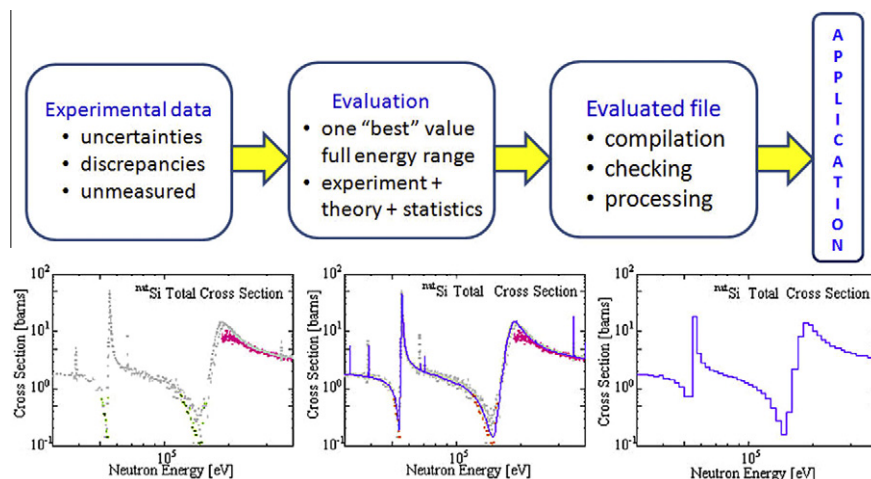


Fig. 1. Different steps in nuclear data evaluation and processing.

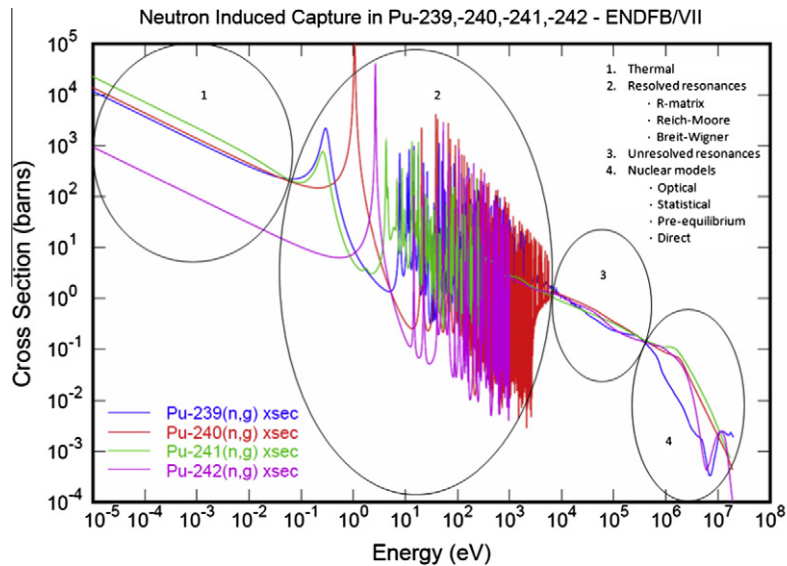


Fig. 2. Capture cross-section for different Pu isotopes.

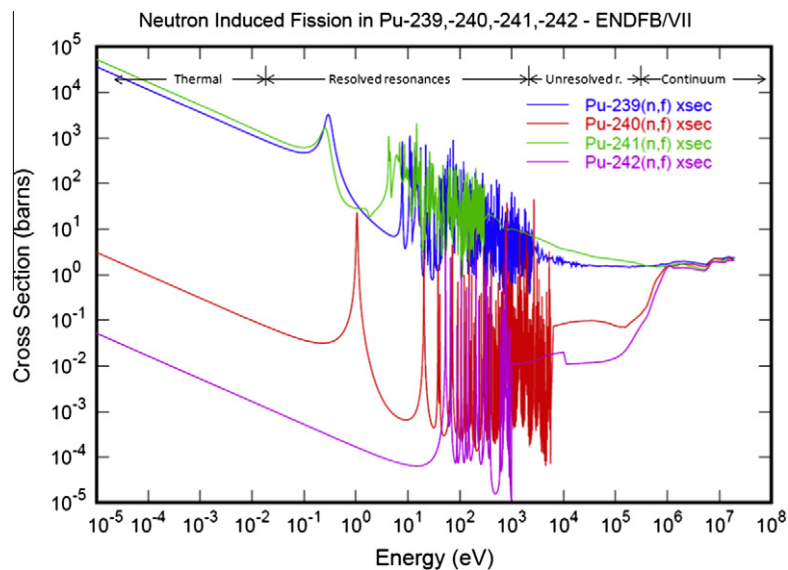


Fig. 3. Fission cross-section for different Pu isotopes.

- **RIPL**, Reference input parameter library for calculation of nuclear reactions and data evaluations, <http://www-nds.iaea.org/ripl2/>.
- **EVA**, Evaluated nuclear data, <http://www.oecd-nea.org/dbdata/eva/>.

These data-bases and the modelling codes are available from

- Nuclear Data Centres
 - OECD/NEA Data Bank Nuclear Data Service (Paris)
 - IAEA Nuclear Data Section (NDS Vienna)
 - US National Nuclear Data Center (BNL, Brookhaven)
 - Russian Center for Nuclear Data (CJD Obninsk)
 - JAEA Nuclear Data Center (Tokai-mura)
 - Nuclear and Atomic Data and Codes
 - TENDL-2011: TALYS-based Evaluated Nuclear Data Library
- Computer Code Centres
 - OECD/NEA Data Bank Computer Program Service

- ORNL/RSICC - Radiation Safety Information Computational Center

Several evaluated nuclear data libraries have been developed over the last several decades. Those most widely used are shown in Table 1 in **bold** and can be retrieved on-line from the Nuclear Data Centres (Fig. 5).

Data evaluations available today have not all reached adequate precision for a number of advanced applications and planned developments. Further efforts are being carried out at national and international level to reduce data uncertainties where it is most critical. Table 2 lists a number of nuclides and reactions for which current precision does not yet meet the target accuracies. An international committee (Working Party on Evaluation Co-operation, <http://www.oecd-nea.org/science/wpec>) involving all major nuclear data producing centres meets yearly to monitor progress and to plan work for improving the most critical data. In support of this a High Priority Request List (HPRL, <http://>

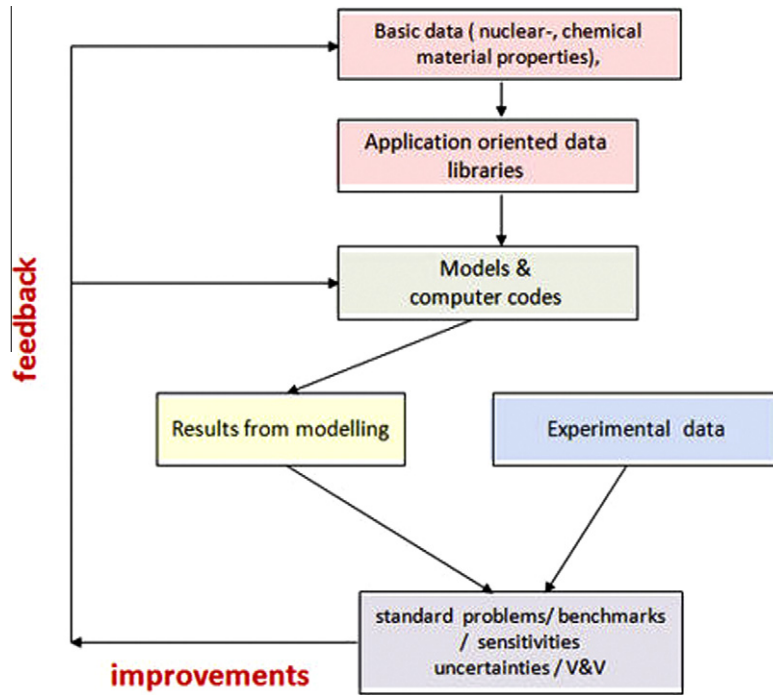


Fig. 4. Simulation, verification, validation and feedback procedure.

Table 1
Nuclear data available on-line.

BROND-2.2	BROND-2004.1	CENDL-2.0	CENDL-2.1
CENDL-3.1	EFF-2.4	ENDFB-6.2	ENDFB-6.3
ENDFB-6.4	ENDFB-6.5	ENDFB-6.6	ENDFB-6.7
ENDFB-6.8	ENDFB-7.1	ENDFHE-6.2	ENDFHE-6.4
FENDL-2.1	IRDF-2002.0	IRDF-90.2	JEF-2.2
JEFF-3.0	JEFF-3.1	JEFF-3.11	JENDL-2004.1
JENDL-2005.0	JENDL-2007.0	JENDL-2008.1	JENDL-3.2
JENDL-3.3	JENDL-4.0	PADF-2007.0	STANDARDS-2006.0
UKEF-1.1	UKHEDD-2.1	UKHEDD-2.2	UKHEDD-2.4
UKHEDD-2.6	UKPADD-3.0	UKPADD-6.1	UKPADD-6.10
UKPADD-6.5	UKPADD-6.6	UKPADD-6.8	UKPADD-6.9
TENDL-2011			

In order to facilitate users the interpretation of nuclear data, user-friendly software has been developed for their visualisation and manipulation. Several exist and can be used on line (e.g. JANIS, <http://www.oecd-nea.org/janis/>).

The most widely used computer code for interpreting and processing evaluated nuclear data libraries is NJOY (McFarlane and Muir, 1994). It is a comprehensive nuclear data processing system designed to convert physics data in the Evaluated Nuclear Data Files (ENDF) (McFarlane, 1998a) format into forms useful for nuclear applications (Fig. 6). It is used to prepare data, in particular cross-sections, for particle transport codes using both deterministic multi-group and continuous energy Monte Carlo methods. The code also makes some physics additions to the basic ENDF data, including radiation heating and damage, gas production, and thermal scattering from liquid and solid moderator materials. NJOY is also useful for supporting data work, both experimental

www.oecd-nea.org/dbdata/hprl/) is maintained, guiding work for measurement nuclear theory and evaluation programmes.

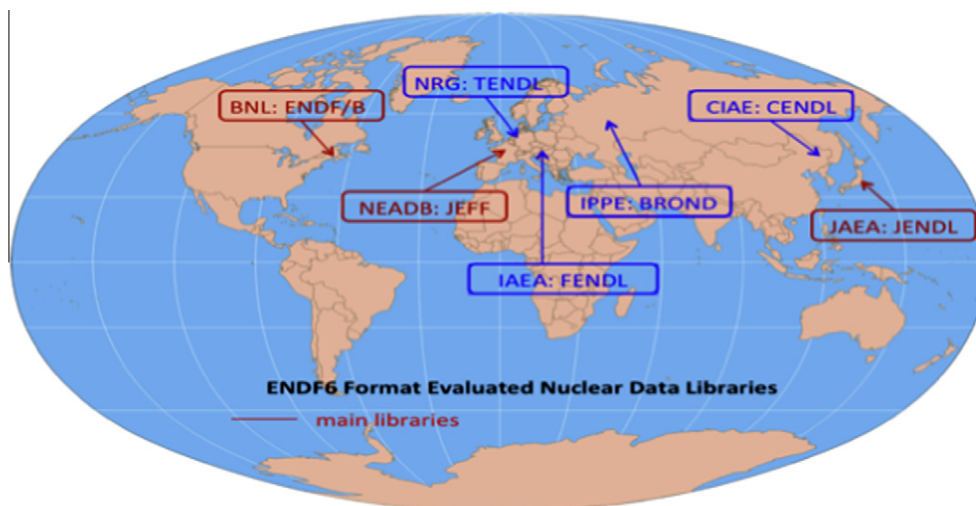
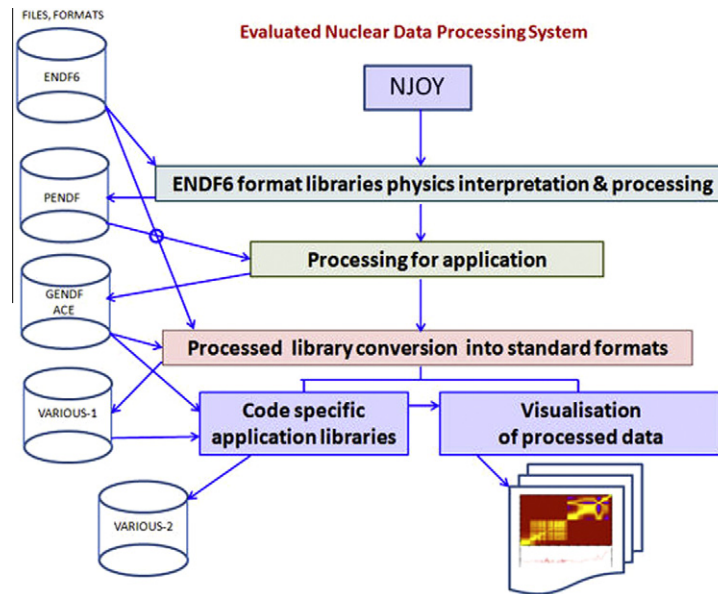


Fig. 5. Nuclear data centres.

Table 2

Example of available precision today and required precision.

Nuclides	Reactions	Energy region	Currant accuracy (%)	Target accuracy (%)
^{238}U	Inelastic	0.498–6.07 MeV	10–20	2–3
	Capture	2.04–24.8 keV	3–9	1.5–2
^{241}Pu	Fission	454 eV–1.35 MeV	8–20	2–3 or 5–8
^{239}Pu	Capture	2.04–498 keV	7–15	4–7
^{240}Pu	Fission	0.498–1.35 MeV	6	15–2
	Number of neutrons per fission	0.498–1.35 MeV	4	1–3

**Fig. 6.** The NJOY evaluated nuclear data processing system.

and in evaluation, through the analysis of experiments, display, and sensitivity studies.

3. Data required for determining the source term (McFarlane, 1998b)

The basic data and tools required for estimating the radioactive source intensity are essentially the following:

1. Activation cross sections library
 - Good capture cross sections for about 200 important fission-product nuclides (^{31}Ga – ^{71}Lu).
 - Capture, fission, and higher energy threshold reactions for a large number of actinide isotopes.
 - For accelerators all reaction channels are needed, for all targets with significant lifetimes, for energies up to ~ 150 MeV (threshold for pion $\pi^{\pm,0}$ formation), for both neutrons and protons. This involves more than 10 000 important reactions, many of which have never been measured.
2. Fission product yields library

The two fission fragments are normally not equal in size. The result is a distribution of possible fission fragments known as a fission-product yield distribution, which has two peaks (Fig. 7). These distributions are very important for the operation of fission power reactors; they affect parasitic absorption, on-power decay heat, decay heat after shutdown or emergency scram, and delayed neutrons (which are important factors for reactor kinetics and control). Because of their importance for both operations and safety, fission-product

yield distributions are made available in computer files for reactor calculations and characterisation of spent fuel.

3. Decay data library

- The lifetimes and modes of decay of radioactive nuclei have been studied intensively over the history of nuclear physics. Their evaluations provide a consistent set of “best” data for each nuclide, stored in the Evaluated Nuclear Structure Data File, ENSDF.
- The decay-data sub-libraries in ENDF6 format contain sections that describe the decay modes, mode lifetimes, decay energies, and spectra of decay products (neutrons, α , β^+ , β^- , γ , and X rays). Table 3 shows at the bottom left the long lived natural radioactive isotopes. Np has long disappeared

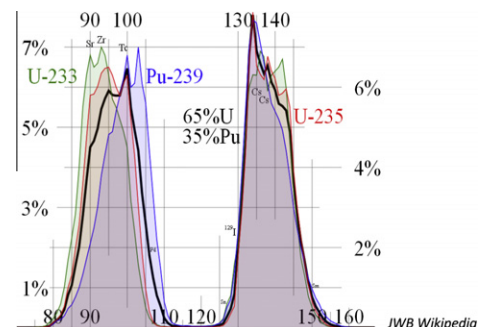
**Fig. 7.** Fission product yields by mass for thermal neutron fission of $^{233,235}\text{U}$ and ^{239}Pu .

Table 3
The four main decay chains (thorium, neptunium, uranium, and actinium).

GENDF ACE	Actinides		Half-life	Fission products
	^{244}Cm	^{241}Pu f	^{250}Cf ^{243}Cm f	10–30 a
^{232}U f	^{238}Pu f	^{238}Pu f is for fissile	69–90 a	^{151}Sm →
4n Th series	^{249}Cf f	^{242}Am f	141–351 a	No fission product has half-life 10^2 to 2×10^5 years
^{240}Pu	^{241}Am	^{251}Cf f	431–898 a	
4n Th series	^{245}Cm f	^{246}Cm ^{243}Am	5–7 ka	Long-lived fission products
^{239}Pu f	^{239}Pu f	^{230}Th ^{231}Pa	8–24 ka	
4n+1 Np series	^{243}Am	^{234}U ^{237}Np	211–290 ka	^{99}Tc ^{126}Sn ^{79}Se
^{248}Cm	^{242}Pu	4n+3 Ac series	340–373 ka	^{93}Zr ^{135}Cs →
4n+1 Np series	^{237}Np	^{247}Cm f	1–2 Ma	^{107}Pd ^{129}I
^{236}U	^{244}Pu	4n+2 U series	6–23 Ma	>7% >5% >1% >.1%
^{232}Th	^{238}U	^{235}U f	80 Ma	
			0.7–1.2 Ga	

← VARIOUS-1 → Wikimedia

from the earth crust but reappears in the current industrial activities. Some of the isotopes are very short lived and disappear after a relatively short ‘cooling’ time, which can be engineered through isolation from the biosphere. This is the case for most fission products and some ‘minor’ actinides. A major issue concerns, how to manage the longer lived radionuclides.

4. Inventory codes

The inventories of radionuclides can be calculated as a function of time for a system exposed to a flux of radiation (neutrons or protons, usually) with use of the basic data just described. This calculation requires solving a set of coupled differential equations (Bateman) providing the balance between production (by a reaction, or as a fission product) and destruction (by a reaction, or by decay) of each possible nuclide. The most widely used inventory codes, <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/list/category/d>, are the following: ORIGEN, FISPACT, EASY, CINDER, CARL, ANITA.

4. Radioactive waste types

Low-level-waste (LLW) arises in the normal operation of nuclear power plants and fuel cycle facilities, as well as from the use of

radioactive isotopes in medicine, industry and agriculture, the half-lives in the waste are short enough that effective disposal is achievable by deposition in supervised near-surface vaults, whilst decay takes place.

Intermediate-level-waste (ILW) is short lived (≤ 30 a) and long lived (>30 a) and requires special handling to limit radiation exposures. Some forms require long-term isolation because of the long-lived radionuclides that they contain. Typical examples of ILW are filter ion-exchange resins, filter sludges, precipitates, evaporator concentrates, incinerator ash and fuel cladding.

High-level-waste (HLW) refers to the highly radioactive wastes requiring shielding and permanent isolation from the biosphere; it arises as a by product of nuclear power generation, typically the spent nuclear fuel needing long-term cooling.

The IAEA has developed a Safety Guide (IAEA, 2004) providing values of activity concentration for bulk amounts of material containing radionuclides of artificial origin, derived using the exemption concept (e.g. effective doses to individuals $10 \mu\text{Sv}$ or less in a year, etc.). It lists the following 225 radionuclides + 32 isomers for clearance of LLW:

- ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{18}F , $^{22,24}\text{Na}$, ^{31}Si , $^{32,33}\text{P}$, ^{35}S , $^{36,38}\text{Cl}$, $^{42,43}\text{K}$, $^{45,47}\text{Ca}$, $^{46,47,48}\text{Sc}$, ^{48}V , ^{51}Cr , $^{51,52,52m,53,54,56}\text{Mn}$, $^{52,55,59}\text{Fe}$, $^{55,56,57,58,58m,60,60m,61,62m}\text{Co}$, $^{59,63,65}\text{Ni}$, ^{64}Cu , $^{65,69,69m}\text{Zn}$, ^{72}Ga , ^{71}Ge , $^{73,74,76,77}\text{As}$, ^{75}Se , ^{82}Br , ^{86}Rb , $^{85,85m,87m,89,90,91,92}\text{Sr}$, $^{90,91,91m,92,93}\text{Y}$, $^{93,95,97}\text{Zr}$, $^{93m,94,95,97,98}\text{Nb}$, $^{90,93,99,101}\text{Mo}$, $^{96,96m,97,97m,99,99m}\text{Tc}$, $^{97,103,105,106}\text{Ru}$, $^{103m,105}\text{Rh}$, $^{103,109}\text{Pd}$, $^{105,110m,111}\text{Ag}$, $^{109,115,115m}\text{Cd}$, $^{111,113m,114m,115m}\text{In}$, $^{113,125}\text{Sn}$, $^{122,124,125}\text{Sb}$, $^{123m,125m,127,127m,129,129m,131,131m,132,133,133m,134}\text{Te}$, $^{123,125,126,129,130,131,132,133,134,135}\text{I}$, $^{129,131,132,134,134m,135,136,137,138}\text{Xe}$, $^{131,140}\text{Ba}$, ^{140}La , $^{139,141,143,144}\text{Ce}$, $^{142,143}\text{Pr}$, $^{147,149}\text{Nd}$, $^{147,149}\text{Pm}$, $^{151,153}\text{Sm}$, $^{152,152m,154,155}\text{Eu}$, $^{153,159}\text{Gd}$, ^{160}Tb , $^{165,166}\text{Dy}$, ^{166}Ho , $^{169,171}\text{Er}$, $^{170,171}\text{Tm}$, ^{175}Yb , ^{177}Lu , ^{181}Hf , ^{182}Ta , $^{181,185,187}\text{W}$, $^{186,188}\text{Re}$, $^{185,191,191m,193}\text{Os}$, $^{190,192,194}\text{Ir}$, $^{191,193m,197,197m}\text{Pt}$, $^{198,199}\text{Au}$, $^{197,197m,203}\text{Hg}$, $^{200,201,202,204}\text{Tl}$, ^{203}Pb , $^{206,207}\text{Bi}$, $^{203,205,207}\text{Po}$, ^{211}At , $^{225,227}\text{Ra}$, $^{226,229}\text{Th}$, $^{230,233}\text{Pa}$, $^{230,231,232,233,236,237,239,240}\text{U}$, $^{237,239,240}\text{Np}$, $^{234,235,236,237,238,239,240,241,242,243,244}\text{Pu}$, $^{241,242,242m,243}\text{Am}$, $^{242,243,244,245,246,247,248}\text{Cm}$, ^{249}Bk , $^{246,248,249,250,251,252,253,254}\text{Cf}$, $^{253,254,254m}\text{Es}$, $^{254,255}\text{Fm}$.

Doses emitted by such nuclides need thus to be determined for radiation protection and waste classification purposes; in order to

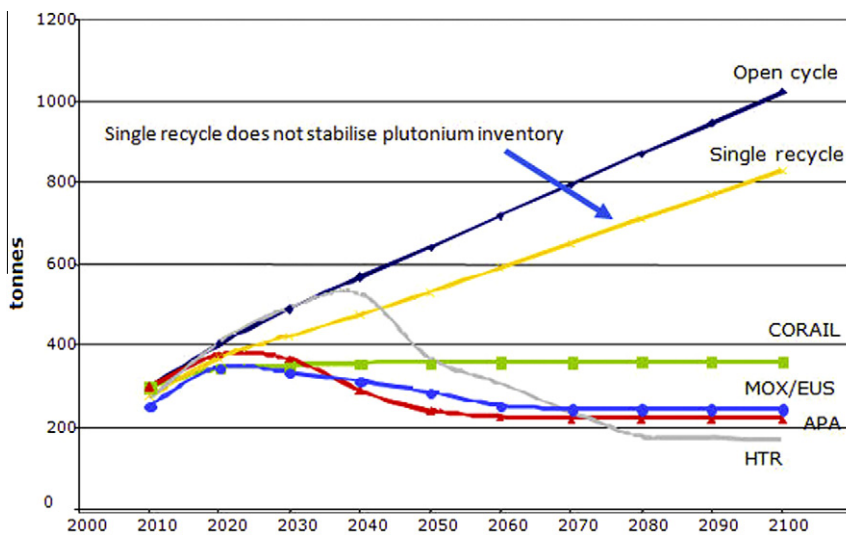


Fig. 8. Limitations of current plutonium recycling options.

Table 4

Main spallation nuclides with long half-lives in a Pb–Bi alloy.

Isotope	Half-life	Liq.-gas T^0 (°C)	Predominant radiation (MeV)
^{210}Po	0.38 a	254–962	α 5.3
^{209}Po	103 a	254–962	α 4.88
^{208}Po	2.93 a	254–962	α 5.11
^{208}Bi	0.37 Ma	271–1564	EC- γ 2.6
^{207}Bi	30 a	271–1564	β^+ 0.56
^{204}Tl	3.77 a	304–1473	β^- 0.76
^{203}Hg	0.13 a	–39–357	β^- 0.2
^{194}Hg	1.9 a	–39–357	EC 0.4

achieve this, cross-sections for producing these nuclides through activation, fission and other nuclear reactions need to be evaluated and stored in nuclear data libraries.

5. Plutonium recycling (OECD, various) in the medium (OECD, 2003) and long term

Whatever the viewpoint, as to whether plutonium be treated as a waste or as an energy resource, the stockpile of plutonium, either accumulated in spent fuel, or extracted from spent fuel for reuse as fuel in current or future reactors, increases steadily. Several technical options have been investigated for the management of the stockpile in the medium term, in particular its stabilisation. Fig. 8 shows the performance and limitations of different options investigated for the medium term. The open cycle (UO_2) case corresponds to the uppermost (blue) curve. The total inventory of plutonium accumulates at a rate dependent on the output of the power plant park. The single-recycle MOX case also accumulates plutonium steadily, though at a lower rate; in any case it does not stabilise plutonium inventory. The other options are all able to stabilise the total plutonium inventory at various levels between 200 and 400 tonnes. This demonstrates how effective these advanced options are at preventing the steady accumulation of the total plutonium inventory. The majority of the options considered are aimed at LWRs, reflecting the present dominance of LWRs and the likelihood that it will persist over the medium term. The option of single recycle as MOX in LWRs is already soundly established on a commercial scale and presents very low technical risk to utilities (essentially the same technical risk as UO_2 fuel in a once-through cycle) and requires the minimum of future development to

support. Other options, especially those involving non-oxide fuels, represent a higher technical risk, and will require extended research and development programmes to establish on a commercial scale. However, many of these more advanced options have the potential to deliver significant benefits over the single MOX recycle approach.

The major observations on plutonium recycling studies and experience are as follows:

Multiple MOX recycle in standard PWRs is practical at least as far as the second recycle generation. The highly-moderated PWR overcomes problems with void coefficients and extends multiple recycle beyond two generations. It also shows a reduction of radio-toxicity in the waste stream and higher plutonium consumption. Thermal MOX recycle, with or without multiple recycle is compatible with later transfer to fast reactors/advanced systems and for maintaining future options.

For all investigations and practical implementations of plutonium recycling leading to a reduced waste stream, good quality nuclear data libraries as those described previously are required especially those relative to major and minor actinide isotopes.

Another aspect of waste minimisation and management that has been intensively investigated is technical approaches for minor actinide burning in thermal reactors, including LWRs, HWRs, and HTRs. The implications for enrichment, fuel fabrication, in-core fuel management, fuel cycle economics and irradiated fuel and waste management were assessed in terms of kg of minor actinides destroyed per TWhe electrical output and the irradiation timescales. Minor actinide burning R&D is currently still at the conceptual stage and has yet to progress beyond theoretical studies and small-scale laboratory sample sizes. To progress to commercial scale demonstration and eventually commercial deployment will demand a large commitment. The studies carried out have required the use the latest improved cross-section libraries. A consensus view on this issue is being finalised by (OECD, 2013).

6. Transmutation using accelerator driven systems (ADS) (OECD, 2002)

Different strategies have been investigated in recent years for transmuting in an evolutionary manner nuclear waste. These include plutonium utilisation in conventional reactors and confining the minor actinides to a smaller part of the fuel cycle. New

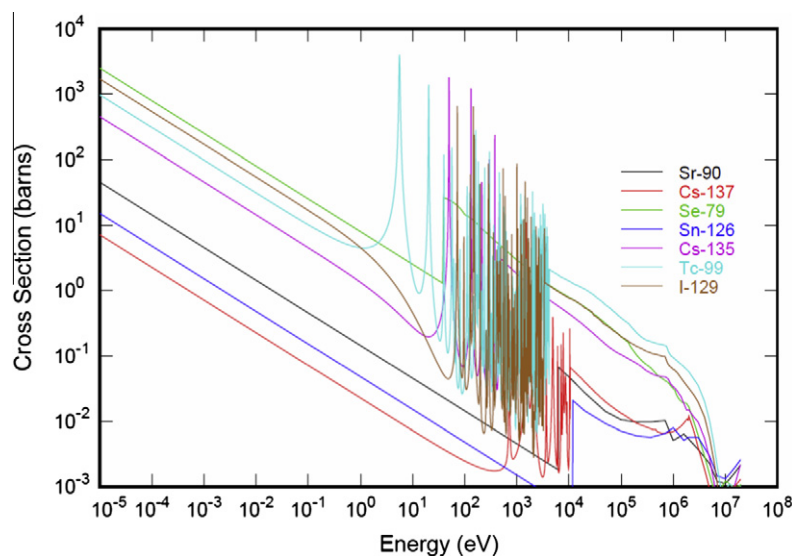


Fig. 9. Capture cross section for selected fission products.

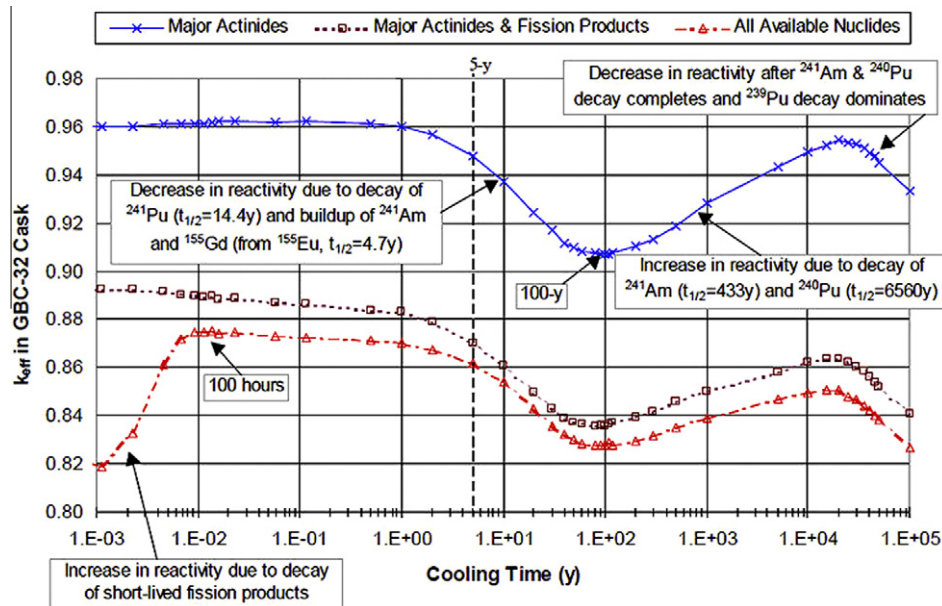


Fig. 10. Values of k_{eff} for an ∞ planar array as a function of database axial profiles for 38–42 GWD/MTU.

Table 5
Biologically significant long-lived radioisotopes in spent fuel.

Isotope	Half-life	Decay mode	Daughter product
^{90}Sr	0.07 a	β	^{90}Y
^{99}Tc	0.213 Ma	β	^{99}Ru
^{137}Cs	0.08 a	β	^{137}Ba
^{237}Np	2.14 Ma	α	^{233}Pa
^{239}Np	0.006a	β	^{239}Pu
^{238}Pu	0.24 a	α	^{234}U
^{239}Pu	0.024 Ma	α	^{235}U
^{241}Pu	0.04 a	β	^{241}Am
^{241}Am	432 a	α	^{237}Np
^{242}Cu	0.446 a	α	^{238}Pu

transuranium isotopes burning strategies are considered in which plutonium and minor actinides are managed together to minimise the proliferation risk. These include fast reactors and accelerator driven systems (ADS). An accelerator-driven system combines a particle accelerator with a sub-critical fissionable core. The proton accelerator, delivers a continuous-wave beam with an energy around 1 GeV. High-power accelerators of several tens of MW are required for the purpose. The proton beam through interaction with a heavy-metal spallation target produces source neutrons for driving the subcritical core. The target is made of heavy metal in solid or liquid state emitting a few tens of neutrons per incident proton.

For the high energy part of protons interacting with the heavy target, cross sections, rather than extracting them from existing libraries, are produced on the fly when required at specific energies with nuclear models. Cross-section libraries for energies higher than the threshold of pion emissions ($\pi^{0,\pm} \approx 150$ MeV) are rarely produced because the number of reaction channels opening from that energy on is increasing drastically, leading to an unmanageable size of files and difficulty in maintaining them. The preferred heavy metal targets for proton projectiles are Pb or a Pb–Bi alloy. Table 4 shows the long-lived nuclides produced in the spallation process.

The neutron capture process is currently the only promising nuclear reaction for transmuting fission products. But capture removes neutrons and thus can be used in system with sufficient

excess neutrons in the overall balance. The transmutation of a fission product makes sense only if the reaction rate (product of microscopic cross-section with neutron flux) is higher than the decay rate of the nuclide. With the currently achievable neutron fluxes, this condition cannot be met for the most abundant fission products ^{137}Cs and ^{90}Sr with half-lives of only about 30 years. It cannot be used either for the longer-lived ^{126}Sn . In fact these nuclides have capture cross sections that are 1–3 orders of magnitude smaller than those of other longer lived nuclides such as ^{129}I , ^{135}Cs , ^{99}Tc , and ^{79}Se (Fig. 9). In practice, only ^{129}I and ^{99}Tc can be transmuted and the radiological impact of the other fission products can be reduced only by special conditioning and confinement.

7. Spent fuel

Spent nuclear fuel is considered by some as a waste, by others as recoverable fissile and fissionable, breedable isotopes. Notwithstanding ideological or energy strategy considerations, modelling of the behaviour of these materials is a requirement for the purpose of licensing spent fuel management. It concerns such different industrial activities and safety considerations as:

- Handling (fabrication, reprocessing): criticality, radiation shielding, clearance (LLW).
- Transportation (road, rail, ship, plane): criticality, burnup-credit,¹ radiation shielding.
- Storage (wet, dry): criticality, burnup-credit, radiation shielding, decay heat.
- Repository (intermediate, geological): inventory, radiotoxicity, decay-heat, release to environment.

The investigations must ensure that such operations will not cause a criticality accident, that radiation doses to biological environment are well within permitted limits, that the hot spent fuel is properly cooled for the required length of time. The connected studies require good quality nuclear data for licensing purposes. The simulation of spent fuel behaviour requires the knowledge of

¹ Burn-up credit is a term that applies to the reduction in reactivity of burned nuclear fuel due to the change in composition during irradiation.

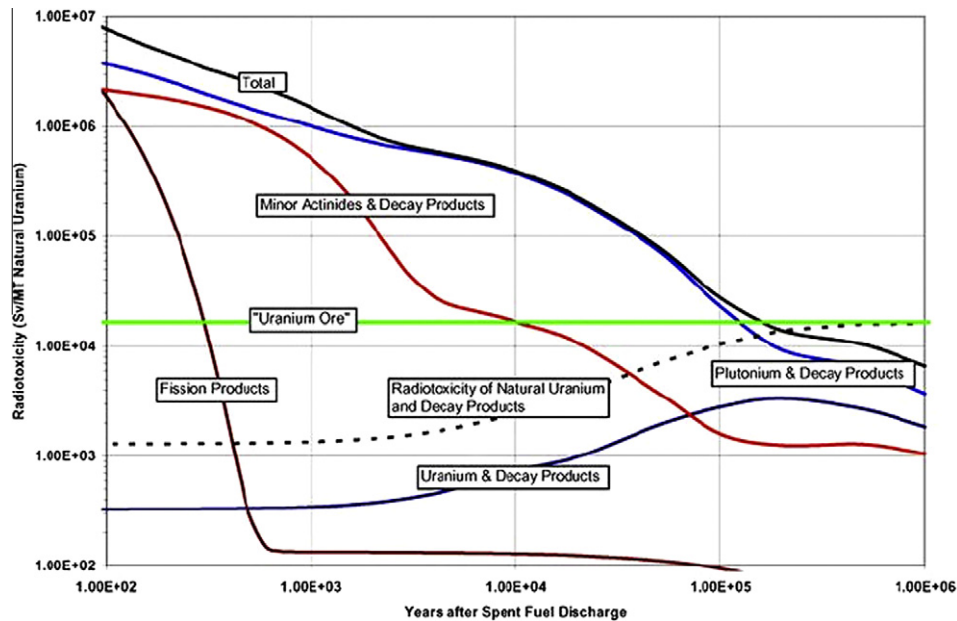


Fig. 11. Radiotoxicity of once-through spent nuclear fuel and its evolution in time (OECD, 2006).

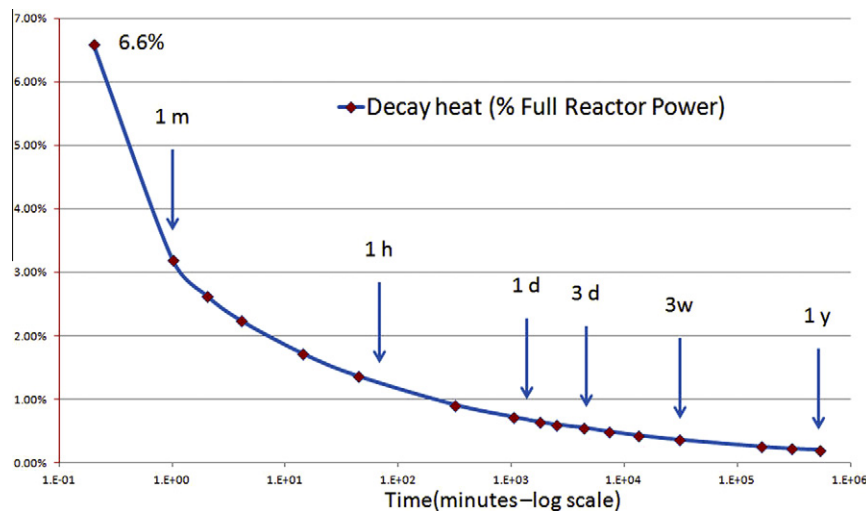


Fig. 12. Decay-heat after reactor shut-down in per-cent of full Power.

the parameters such as geometry of configuration, composition of materials and inventory of radioactive isotopes and nuclear data.

The physical quantities required for the different investigations for nuclear waste management are:

For criticality safety, waste management (HLW)

- Fission and capture cross-sections, fission yields, decay data, activation cross-sections.

Clearance

- Radio-isotope production cross sections, decay data (LLW).

Radiation shielding calculation (radiation transport, deep penetration)

- Elastic scattering cross-sections and angular distribution, neutron disappearance cross-section, nuclear structure and decay data.

Dose evaluation (linear energy transfer)

- Primary knock-on atom (PKA), displacement per atom (dpa), kinetic energy release (kerma) charged particle spectra.

The reactivity of spent fuel can change with cooling time. The key parameter for criticality safety k_{eff} is not a monotonously decreasing or constant function of cooling time, but the different contributions can increase or decrease depending on the overall isotopic composition and resulting neutron balance. The US NRC Staff Guidance 8 (ISG8) recommends that safety analyses be performed at a fixed cooling time of 5 years. Fig. 10 shows the trend for a 32-element, generic burnup-credit cask design (GBC-32). For burnup-credit criticality safety analyses performed at 5 years, increased cooling times result in an increasing conservative safety margin out to ~50 years. The additional benefit for cooling times between 50 and 100 years is insignificant (Parks et al., 2002).

The evolution of the inventory of the different isotopes (major, minor actinides, major fission products) must be estimated in a safety analysis with sufficient precision. Criticality depends both on the isotopic composition and the nuclear cross-sections and decay constants. Considerable effort is devoted internationally to improve the corresponding nuclear data and to reduce their uncertainties.

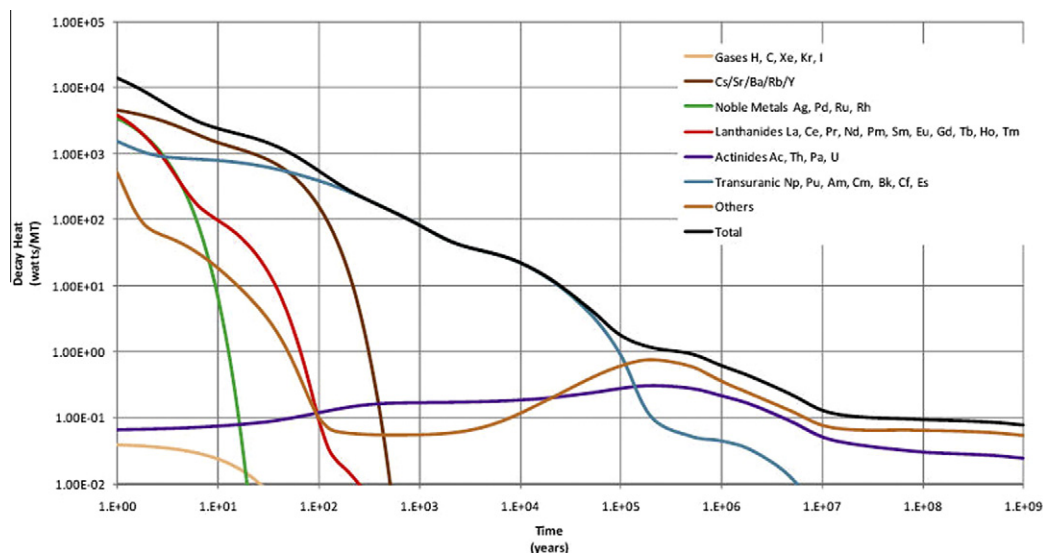


Fig. 13. PWR 60MWd/MT used fuel decay heat (Carter et al., 2011).

Table 6
Radionuclides requiring improved decay data.

Radionuclide	Half-life	Radionuclide	Half-life
35-Br-86	55.1 s	43-Tc-103	54.2 s
35-Br-87	55.65 s (β^- ,n)	43-Tc-104	18.3 min
35-Br-88	16.36 s (β^- ,n)	43-Tc-105	7.6 min
36-Kr-89	3.15 min	43-Tc-106	35.6 s
36-Kr-90	32.32 s	51-Sb-132	2.79 min
41-Nb-98	2.86 s	53-I-136	83.4 s
41-Nb-99	15.0 s	53-I-136 m	46.9 s
41-Nb-100	1.5 s	53-I-137	24.13 s (β^- ,n)
41-Nb-101	7.1 s	54-Xe-137	3.82 min
42-Mo-103	67.5 s	54-Xe-139	39.68 s
42-Mo-105	35.6 s	54-Xe-140	13.6 s
43-Tc-102	5.28 s		

In burnup credit analyses for storage and transportation of spent nuclear fuels the following isotopes need to be taken into account

- Actinides ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am (11).
- Fission products: ^{95}Mo , ^{99}Tc , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{109}Ag , ^{133}Cs , ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{150}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Sm , ^{153}Eu , ^{155}Gd (15).

The biologically significant long-lived radioisotopes in commercial spent fuel are shown in Table 5.

8. Radiotoxicity and decay-heat of spent fuel

One of the objectives of the nuclear fuel cycles is to eventually return to the geosphere in waste form materials with a total toxicity that is not higher than that of the ore extracted for fuel fabrication. During the power production, most of the radiotoxic materials are stored in a safe manner in the core of reactors, in spent fuel on-site storage facilities and in reprocessing plants. This objective can be met only if advanced fuel cycles with reprocessing and use of fast spectrum reactors are part of the overall scenario. A once-through fuel cycle (Fig. 11) cannot achieve this.

The radiotoxicity of the fission products dominates the total radiotoxicity during the first 100 years. Thereafter, their radiotoxicity decreases and reaches the reference level after about

300 years. The long-term radiotoxicity is solely dominated by the actinides, mainly by the plutonium and americium isotopes. For the design of more advanced fuel cycles achieving this goal, additional good quality nuclear data for actinides and fission products are required.

Quantification of decay heat induced by fission is important for the design of nuclear facilities and for the post-irradiation handling of nuclear fuels (fuel discharge, storage, transport and reprocessing, and waste handling). The decay heat decreases very quickly in percentage after shut-down of a power reactor, but the overall quantity is still high (Figs. 12 and 13).

The total decay heat (as well as quantification of the light-particle and electro-magnetic components) as a function of cooling time impacts significantly on the safety and economics of nuclear power generation. This requires comprehensive sets of nuclear data: neutron cross-sections, fission yields and decay data (primarily for fission products and actinides – half-lives, and mean light-particle and electromagnetic energies), and estimates of the uncertainties in these data. Further improvements of decay data are required for proper decay heat estimation. Calculations adopting mean decay data derived from total absorption gamma-ray spectroscopy (TAGS) measurements are able to describe the total decay heat reasonably well. Focus will be on particular fission-product radionuclides that merit such measurement in order to improve decay heat calculations without the need to resort to theory. The radionuclides that contribute the greatest uncertainty of the calculated decay heat for $^{235}\text{U}_{\text{th}}$ are short cooling times uncertainties in fission yields; half-lives of ^{98}Ym and $^{100,102}\text{Nb}$; energy releases for ^{87}Br , $^{89,97}\text{Sr}$, $^{101,102}\text{Nb}$, and ^{143}La .

Ill-defined radionuclides contributing significantly to the decay heat of irradiated nuclear fuel, and for which TAGS would be beneficial are shown in Table 6.

9. Sources of uncertainty in predicting the radioactive source term

There are a number of uncertainties that propagate through the procedures used to predict the radioactive source term; these are:

- Nuclear data uncertainties: nuclear cross-sections, distributions of secondary neutrons.
- Radiation source description: space-, energy-distribution.
- Geometry modelling: configurations, dosimeter locations.

- Material compositions.
- Mathematical methods and simplifications used in computations.

An increased effort is devoted today to providing nuclear data with their uncertainties. The assumption is made that the values follow a normal statistical distribution, thus the average or expected value is used for calculations and the corresponding uncertainties are the second moment of the distribution (standard deviation and correlation matrix = covariance matrix). Many evaluated nuclear data come today with the corresponding covariance data; tools for processing such data for practical use have been developed (Ivanov et al., 2012), so that the source term can be derived with associated confidence bounds.

10. Conclusions

Good quality nuclear data are essential to be able to characterise the different radioactive waste forms, and to provide quality prediction of the source term for waste management. Of major importance are data for the build-up of several radionuclides such as actinides and fission products; also decay-heat issues are important. These data are required to study the different scenarios for power production and waste minimisation; efforts are devoted to improving the quality of the data through validation against experiments, re-evaluation, adding covariance data for uncertainty quantification. A wealth of validated data is available from several Nuclear Data Centres.

References

- Carter, J.T., Jones, R.H., Luptak, A.J., 2011. Used Fuel Disposition U.S. Radioactive Waste Inventory and Characteristics Related to Potential Future Nuclear Energy Systems. May 2011, FCRD-USED-2011-000068.
- Hwang, R.N., 2010. In: Azmy, Y., Sartori, E. (Eds.), *Resonance Theory in Reactor Applications*. Nuclear Computational Science, Springer, 2010, pp. 217–290. ISBN: 978-90-481-3410-6.
- IAEA, 2004. *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*, Safety Guide No. RS-G-1.7.
- Ivanov, K., Avramova, M., Kamerow, S., Kodeli, S., Sartori, E., Ivanov, E., Cabellos, O., 2012. *Benchmark for Uncertainty Analysis In Modeling for Design, Operation and Safety Analysis of LWRs; volume I: Specification and Support Data for the Neutronics Cases*, April 2012, NEA/NSC/DOC(2012) 10.
- McFarlane, R.E., 1998a. *An Introduction to the ENDF Formats*, UC-LANL LA-UR-98-1779.
- McFarlane, R.E., 1998b. *Radioactivity Data*, LANL <<http://t2.lanl.gov/tour/tb004.html>>.
- McFarlane, R.E., Muir, D.W., 1994. *The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91*. LA-12740-M (1994). <<http://t2.lanl.gov/codes/njoy99>>.
- OECD, 2002. *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study*. ISBN: 92-64-18482-1.
- OECD, 2003. *Plutonium Management in the Medium Term – A Review by the OECD/NEA Working Party on the Physics of Plutonium Fuels and Innovative Fuel Cycles (WPPR)*, NEA4451, ©. ISBN: 92-64-02151-5.
- OECD, 2006. *Physics and Safety of Transmutation Systems – A Status Report*, NEA No. 6090. ISBN: 92-64-01082-3.
- OECD, 2013. *Minor Actinide Burning in Thermal Reactors – State of the Art Report*.
- Parks, C.V., Wagner, J.C., Gauld, I.C., 2002. *Research to support expansion of U.S. regulatory position on burnup credit for transport and storage casks; practices and developments in spent fuel burnup credit applications*. In: *Proceedings of an Technical Committee meeting, Madrid, 22–26 April 2002*, IAEA-TECDOC-1378.