



**POLYTECHNIQUE  
MONTREAL**

UNIVERSITÉ  
D'INGÉNIERIE

---

## *Présentation du cours (semaine 1)*

- **Informations générales**
- **Documentation et ressources disponibles**
- **Évaluation**
- **La physique des réacteurs en génie nucléaire**
- **Sujets et organisation de la recherche**

# **Informations générales**

## **Professeur:**

- ❑ **Alain Hébert ([alain.hebert@polymtl.ca](mailto:alain.hebert@polymtl.ca))**

## **Site Moodle:**

- ❑ **<https://moodle.polymtl.ca/course/view.php?id=408>**

- **Site Archives:**

- ❑ **<http://merlin.polymtl.ca/archives.htm>**

- **Livre (obligatoire):**

- ❑ **Alain Hébert, *Applied Reactor Physics*, Presses Internationales Polytechnique, Third edition, Montréal, 2020.**

# **ENE6101**

## **ENE6101 PHYSIQUE STATIQUE DES RÉACTEURS**

(3-0-6) 3 cr.

Cinématique d'une collision élastique neutron-noyau et détermination de la loi de choc. Définition et calcul des sections efficaces pour les réactions nucléaires par noyau composé. L'équation de Boltzmann en milieu homogène: définition et calcul du flux neutronique, présentation de la loi de Fick, étude du milieu multiplicateur en régime stationnaire, discrétisation multigroupe, ralentissement des neutrons et autoprotection des résonances. Calcul du coefficient de diffusion par le modèle du mode fondamental homogène. Évolution ponctuelle des noyaux.

# *Approche pédagogique*

## **Implication personnelle:**

- Cours de 3 crédits:  $3 \times 45 = 135$  h de travail pour la session**
- Triplet (3,0,6): 3 h/semaine d'encadrement et 6 h/semaine de travail personnel (minimum)**

## **Méthode d'enseignement:**

- Apprentissage individuel suivi d'un encadrement professoral**
- Basé sur la résolution de problèmes**
- Évaluation:**
  - ❖ 2 devoirs, 20% chacun, portant sur le chapitre 2
  - ❖ 1 mini-projet, 40%, projet Matlab portant sur le chapitre 3
  - ❖ devoir final, 20%, portant sur le chapitre 4
- L'étudiant dispose de matériel pédagogique spécialisé et **complet****

# *La physique nucléaire*

**La physique nucléaire est l'étude des interactions entre les particules et la matière:**

## **❑ détermination des données nucléaires**

- ❖ sections efficaces et pouvoirs d'arrêt (stopping power) pour les particules chargées
- ❖ lois de choc
- ❖ dépôts d'énergie et production des particules secondaires
- ❖ chaînes de décroissance radioactive

## **❑ outils technologiques**

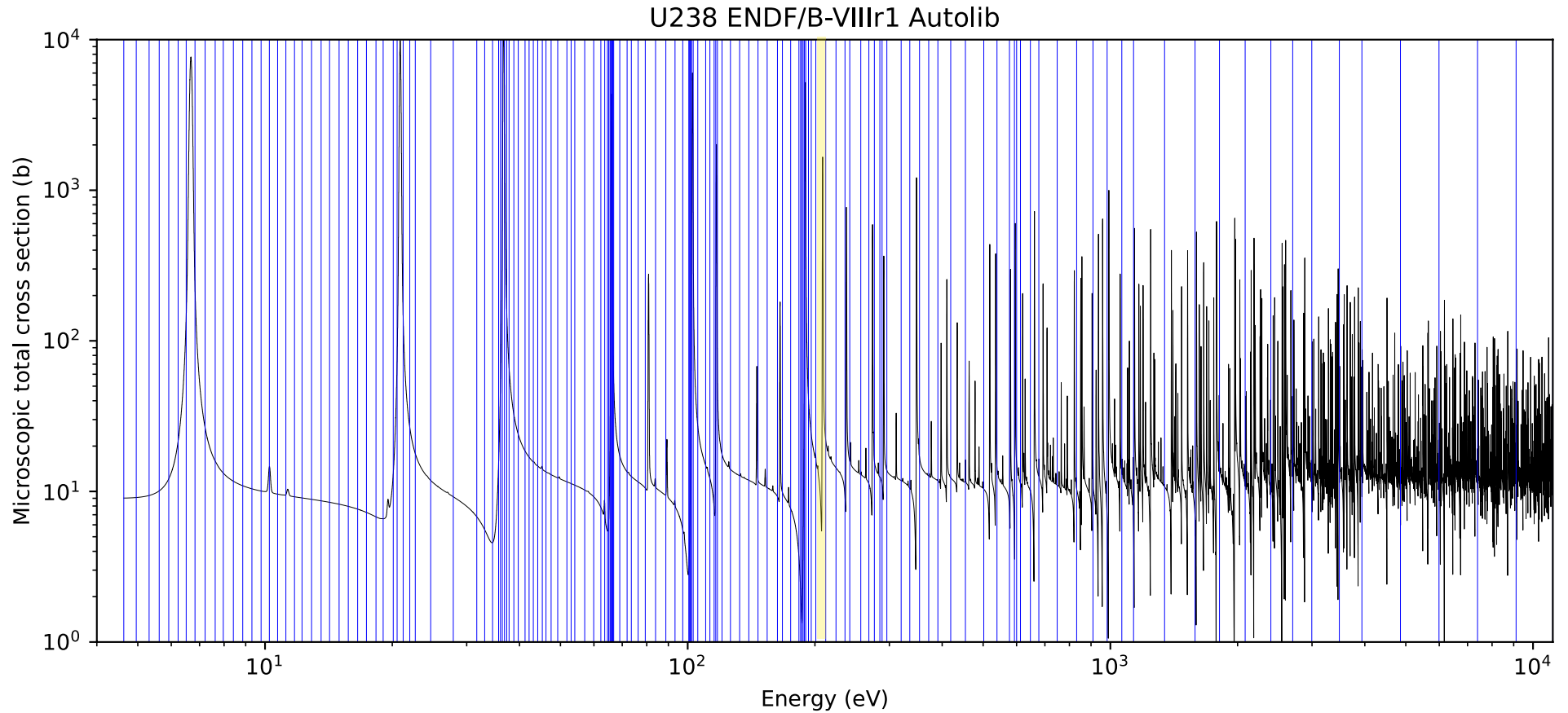
- ❖ mesures au moyen de collisionneurs (CERN, ORELA, GALENA)
- ❖ simulation par modèles de mécanique quantique

## **❑ évaluations de données nucléaires**

- ❖ Produites par des comités (CSEWG, JEFF)
- ❖ Fournies aux ingénieurs nucléaires en format ENDF/B ou GND.
- ❖ Utilisées comme input au code NJOY.

# La physique nucléaire

## Exemple de sections efficaces:



# *Le génie nucléaire*

**Le génie nucléaire est une discipline aval de la physique nucléaire dont le but est l'utilisation des progrès de la physique nucléaire, ainsi que des autres disciplines du génie mécanique, à des fins pratiques (production d'électricité, de chaleur, d'isotopes, traitements médicaux, etc.)**

## **Communiqué de l'AIEA (fin 2022)**

**Dans le scénario le plus favorable, l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) prévoit plus du doublement de la puissance nucléaire installée, qui grimperait à 873 gigawatts (GW) en 2050 contre 390 GW actuellement. Elle misait auparavant sur 792 GW (avant la guerre en Ukraine). Mais “pour y parvenir, il faut surmonter de nombreux défis”, prévient l'Agence.**

# *Le génie nucléaire*

Les 3 disciplines majeures du génie nucléaire sont:

- ❑ **Physique des réacteurs:** Étude des populations de neutrons dans un réacteur nucléaire et calcul de la distribution de puissance (issue de la fission et autres réactions nucléaires) **en fonction du burnup**
- ❑ **Thermohydraulique:** Étude des écoulements fluides et du transfert de chaleur dans une centrale nucléaire
- ❑ **Thermo-mécanique:** Étude des propriétés mécaniques des matériaux présents dans un réacteur nucléaire et prise en compte des effets de l'irradiation sur ces propriétés

**Note:** Un schéma de calcul “multi-physique” prend en compte l'interaction par couplage ou chaînage de ces 3 disciplines.

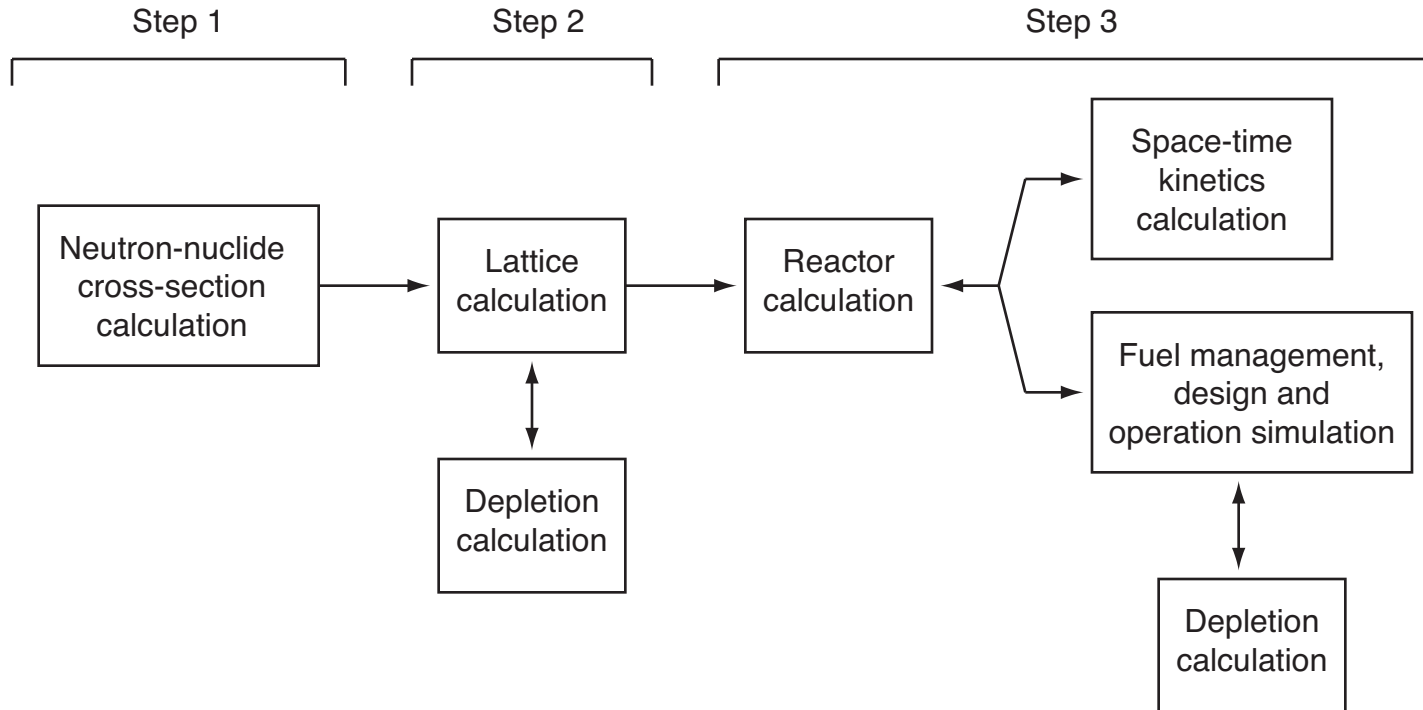
Les disciplines connexes sont:

- ❑ Radioprotection et radiochimie
- ❑ Analyse par activation
- ❑ Sécurité et criticité (Safety and criticality)
- ❑ Disciplines amont et aval du cycle

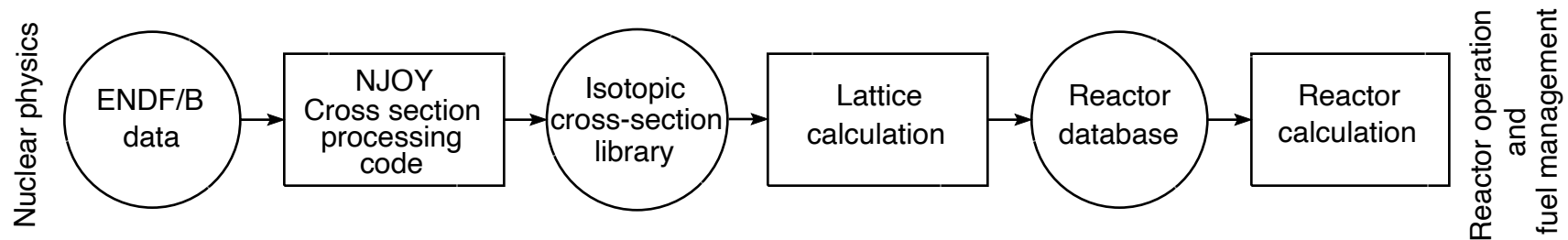


# La physique des réacteurs

- Discipline couvrant les aspects physiques situés entre l'évaluation (ENDF ou GND) et l'opération du réacteur:



# La physique des réacteurs - suite



- **Les 3 étapes de calcul en physique des réacteurs sont:**

- Calcul de sections efficaces (basé sur le code NJOY de Los Alamos)**

- ❖ Permet de traiter l'évaluation ENDF/B de chaque isotope existant dans la nature
- ❖ Calcul sporadique (nouvelle évaluation, condition de fonctionnement non prévue, erreur de traitement, études de propagation d'erreurs)

- Calcul de réseau (calcul de type DRAGON)**

- ❖ Représentation en mode fondamental d'une sous-géométrie périodique du réacteur
- ❖ Calcul de réflecteur en mode non-fondamental

- Calcul de coeur entier (calcul de type DONJON)**

# ***Logiciels utilisés à l'IGN***

## **1. NJOY-2012:**

- **Traitement des évaluations nucléaires en format ENDF/B**
- **Programmé en Fortran-90**
- **Développé par Los Alamos National Laboratory**

## **2. SERPENT2**

- **Calcul de Monte Carlo à énergie continue**
- **Programmé en Ansi C**
- **Développé par VTT technical research centre of Finland**

## **3. OpenMC**

- **Calcul de Monte Carlo multigroupe et à énergie continue**
- **Programmé en C++**
- **Développé par le MIT et UChicago Argonne LLC**

## **4. DRAGON5**

- **Calcul de réseau**
- **Programmé en Fortran 2003**
- **Développé par Polytechnique Montréal**

## **5. DONJON5**

- **Simulation “coeur-entier” de réacteur nucléaire**
- **Programmé en Fortran-2003**
- **Développé par Polytechnique Montréal**

# *Outils informatiques utilisés à l'IGN*

- ❑ **Systeme d'exploitation UNIX (Linux, MacOS, WSL, etc) et Unix shell**
  - ❖ gmake (installation des logiciels et assurance qualité)
  - ❖ éditeurs: gedit, nedit, Sublime Text, etc.
  - ❖ compilateurs: GNU (gcc et gfortran) , LLVM (clang, flang)
  - ❖ outils de communication: ssh, sftp, Cisco Secure Client (VPN)
  - ❖ outils de gestion d'information (svn, git)
- ❑ **Langage de script CLE-2000 (pour Dragon5 et Donjon5)**
- ❑ **Langage python3 (pour les applications professionnelles)**
- ❑ **Langage Matlab (pour l'enseignement)**
- ❑ **Systeme de preparation de documents: LaTeX**
  - ❖ Mémoires et thèses (obligatoire)
  - ❖ Documentation Dragon5/Donjon5
  - ❖ Mini-projet ENE6101 (recommandé)
  - ❖ Préparation aux conférences
- ❑ **Calcul HPC**
  - ❖ OpenMP
  - ❖ MPI

# Serveurs de calcul utilisés à l'IGN

Toutes nos machines sont opérées sur des variantes de UNIX

## ❑ Machines personnelles

- ❖ PC Intel sous WSL
- ❖ Machines MacOS (série M de préférence)
  - utilisés par les développeurs Dragon5/Donjon5
  - <http://merlin.polymtl.ca/howToInstallMac.htm>

## ❑ Serveurs de calcul Intel

- ❖ (user)@boltzmann.recherche.polymtl.ca
- ❖ (user)@doppler.recherche.polymtl.ca

## ❑ Serveurs de calcul ARM

- ❖ (user)@bateman.recherche.polymtl.ca
- ❖ (user)@planck.recherche.polymtl.ca

## ❑ Serveurs “antiques” pour l’assurance qualité

- ❖ (user)@fick.recherche.polymtl.ca (AIX sous PowerPC)
- ❖ (user)@teller.recherche.polymtl.ca (SunOS sous Intel)

# *Sujets abordés dans le cours ENE-6101*

## **1. Sections efficaces et données nucléaires**

1. Angles solides et harmoniques sphériques
2. Distributions et densités de probabilité
3. Lois de choc et sections efficaces
4. Agitation thermique des noyaux (effet Doppler)

## **2. L'équation de transport de Boltzmann**

1. Définition du flux (neutronique ou photonique)
2. Calcul des sources de neutrons, états stationnaire et transitoire
3. Discrétisation multigroupe
4. Résolution par la méthode des probabilités de collision (PIJ)

## **3. Calcul de réseau en mode fondamental**

1. Ralentissement des neutrons et auto protection des résonances
2. Modèle de fuite homogène
3. Évolution isotopique (équation de Bateman)

# Solution de l'équation de Boltzmann

- ❖ La technique de solution la plus précise (et la plus coûteuse) est la méthode de **Monte Carlo**. Plusieurs millions d'historiques de particules sont simulées, basées sur une séquence de nombres aléatoires. La simulation de chaque particule prends en compte ses interactions avec une représentation précise du domaine géométrique et utilise une représentation à énergie continue (ou multigroupe) des sections efficaces.
- ❖ Les techniques de solutions **déterministes** n'utilisent pas de générateur de nombres aléatoires. Elles sont basées sur des techniques d'analyse numériques et sur une discrétisation en angle, espace et énergie de l'équation de Boltzmann. Diverses approches sont proposées:
  - ◆ forme **intégral-différentielle** => méthodes  $P_n$  et  $S_n$
  - ◆ forme **caractéristique** => méthode des caractéristiques (MOC)
  - ◆ forme **intégrale** => méthode des probabilités de collisions  $P_{ij}$

Le flux de particules est utilisé comme variable dépendante et l'équation de Boltzmann est résolue avec ses conditions frontières. Une discrétisation multigroupe de la variable énergie est généralement utilisée.

# Calcul de réseau DRAGON5

Le code DRAGON5 couvre différents domaines d'applications:

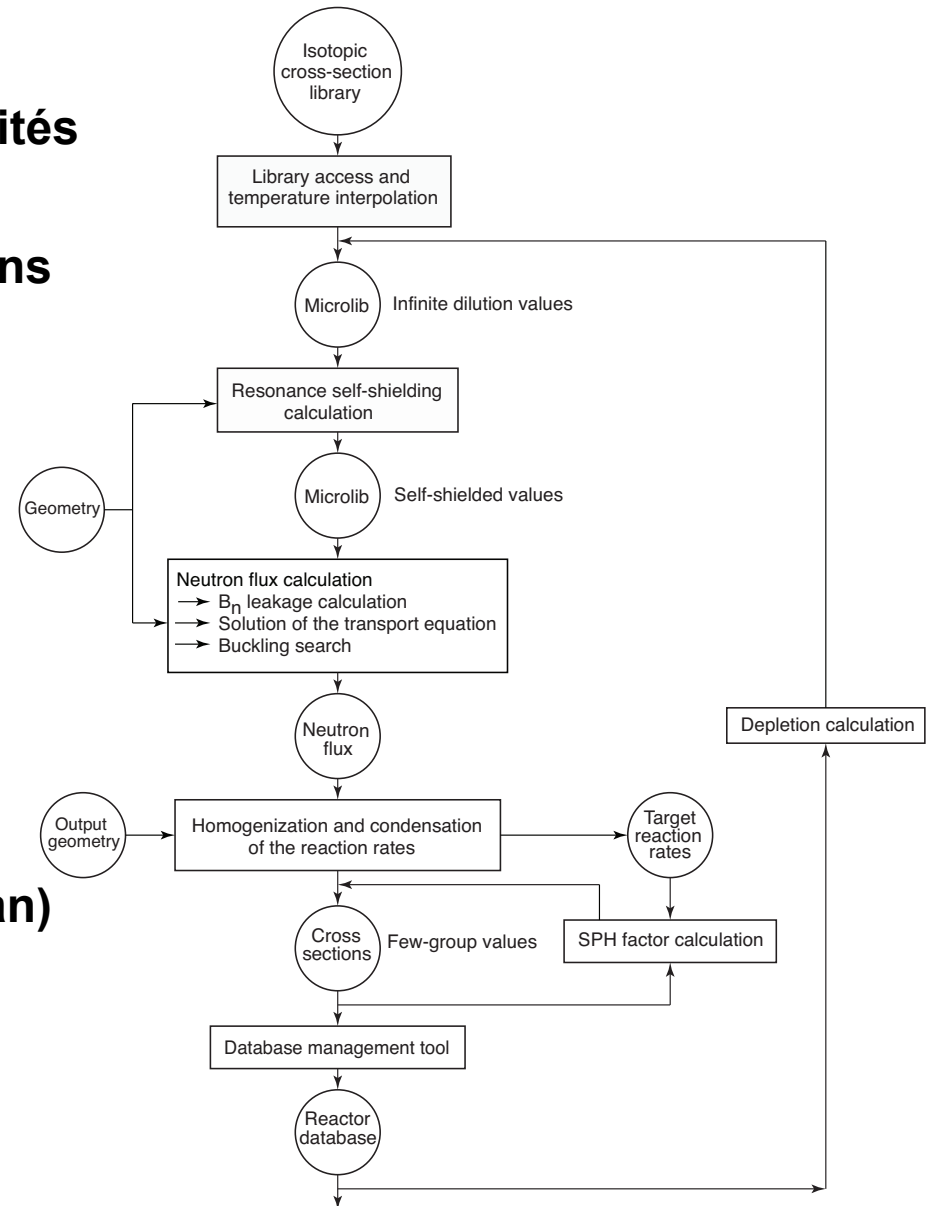
- ❑ solveur de l'équation de transport de Boltzmann (BTE) pour les neutrons, les photons et les électrons
- ❑ permet d'étudier une cellule unitaire, un assemblage de combustible, un colorset, un mini-coeur ou un réflecteur en situation de
  - ❖ **mode fondamental**: situation où la géométrie possède des conditions frontières conservatives (réflexion, translation, symétrie)
  - ❖ **mode non-fondamental**: situation où la géométrie possède des fuites de frontière (vide).
- ❑ générateur de sections efficaces pour un code de simulation de coeur entier, tel que DONJON5
- ❑ permet la programmation de **schémas de calcul** grace au macro-langage CLE-2000
  - ❖ les schémas de calcul ne sont pas inclus dans la distribution DRAGON5
- ❑ **DRAGON5 est offert en Open Source, sous license LGPL**
  - ❖ les schémas de calcul peuvent être développés sous license propriétaire.



# Calcul de réseau DRAGON5

DRAGON5 est un code de réseau de **seconde génération** avec les fonctionnalités suivantes:

1. Accès aux bibliothèques de sections efficaces et interpolation en température.
2. Calcul d'autoptotection des résonances.
3. Calcul de flux principal
4. Homogénéisation et condensation des taux de réaction
5. Calcul des facteurs d'équivalence SPH.
6. Calcul d'évolution isotopique (solution des équations de Bateman)
7. Création d'une base de données réacteur multi-paramètres

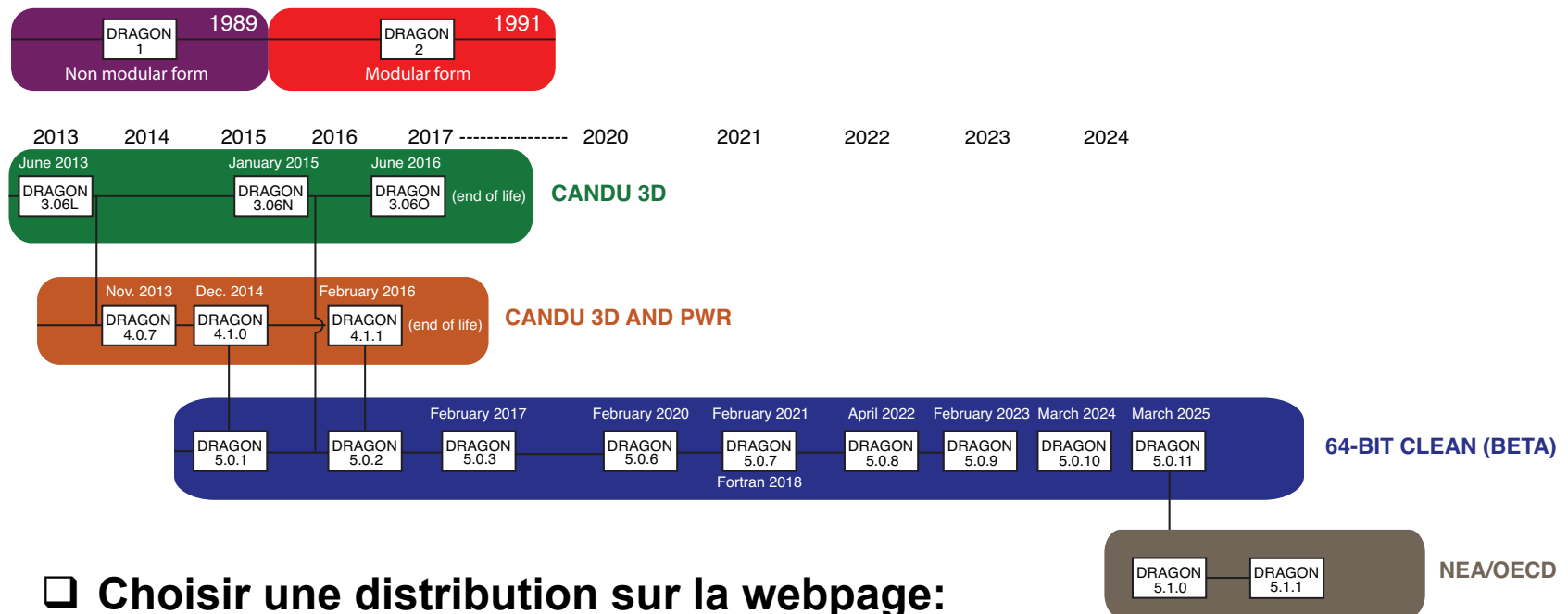


# Calcul de réseau DRAGON5

## Distributions principales de DRAGON

- ❖ **Version3:** La distribution **Industrial Standard Toolset** de l'industrie nucléaire Canadienne. Maintenu par G. Marleau.
- ❖ **Version4:** La distribution **avancée CANDU+PWR**. Maintenu par A. Hébert.
- ❖ **Version5:** La distribution **64-bit clean**. Maintenu par A. Hébert.

### ❑ Roadmap

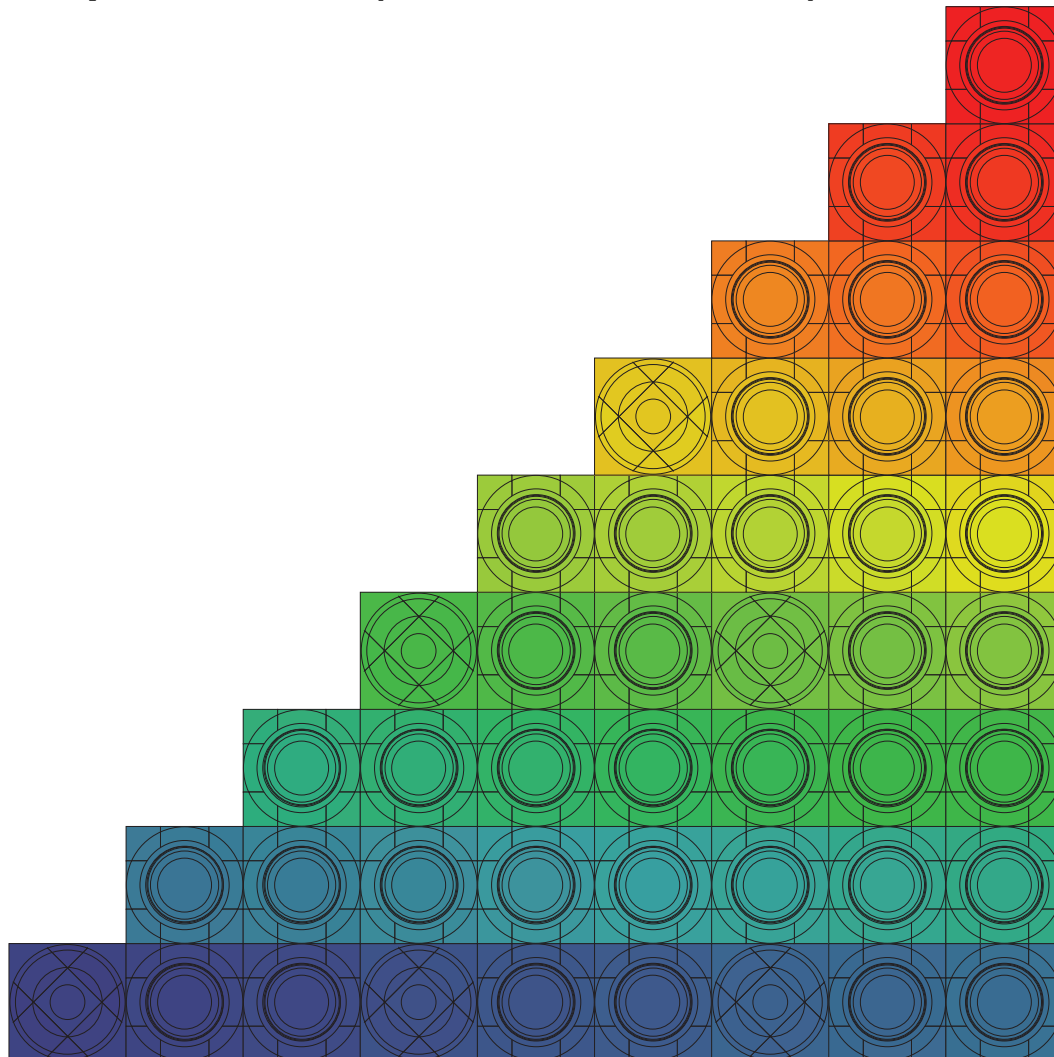


### ❑ Choisir une distribution sur la webpage:

- <http://merlin.polymtl.ca/version5.htm>

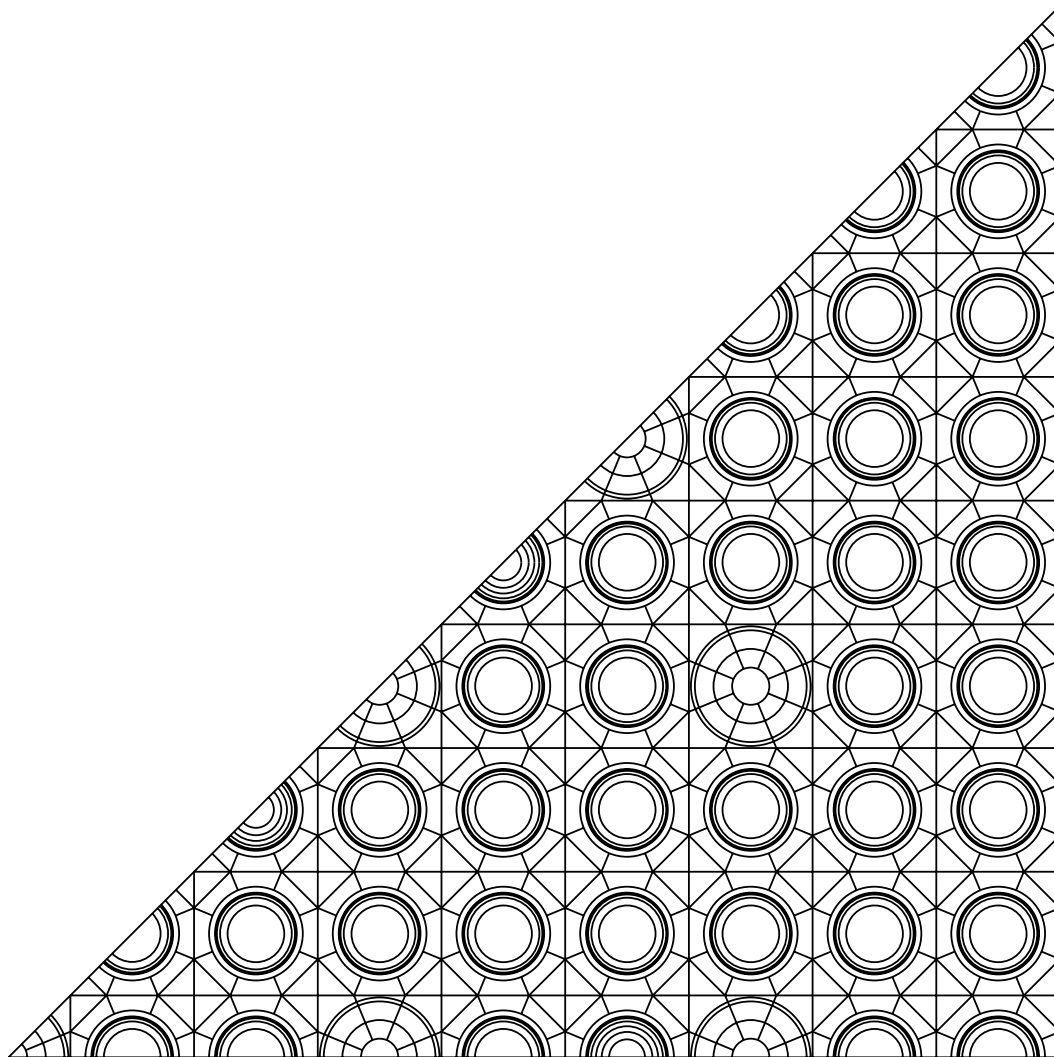
# Géométrie du calcul de réseau

Réacteur à eau pressurisée (discrétisation NXT)



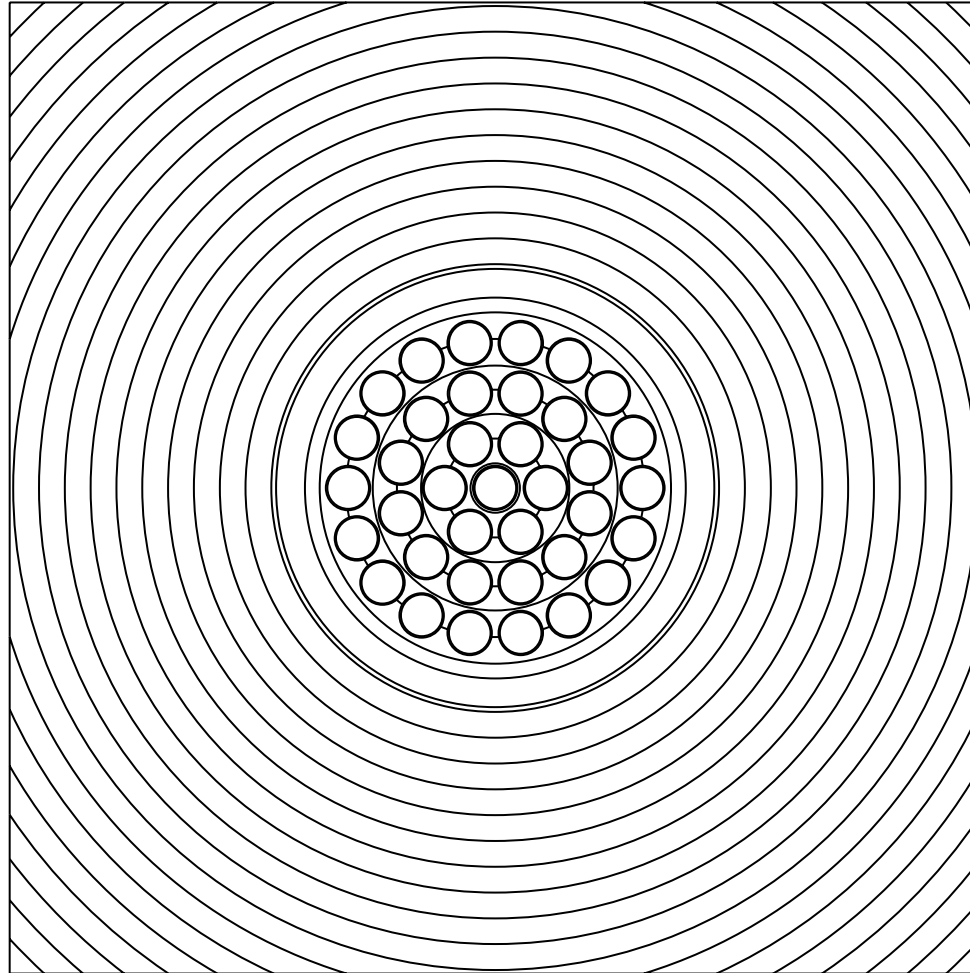
# *Géométrie du calcul de réseau*

**Réacteur à eau pressurisée (discrétisation “moulin à vent” G2S + SALT)**



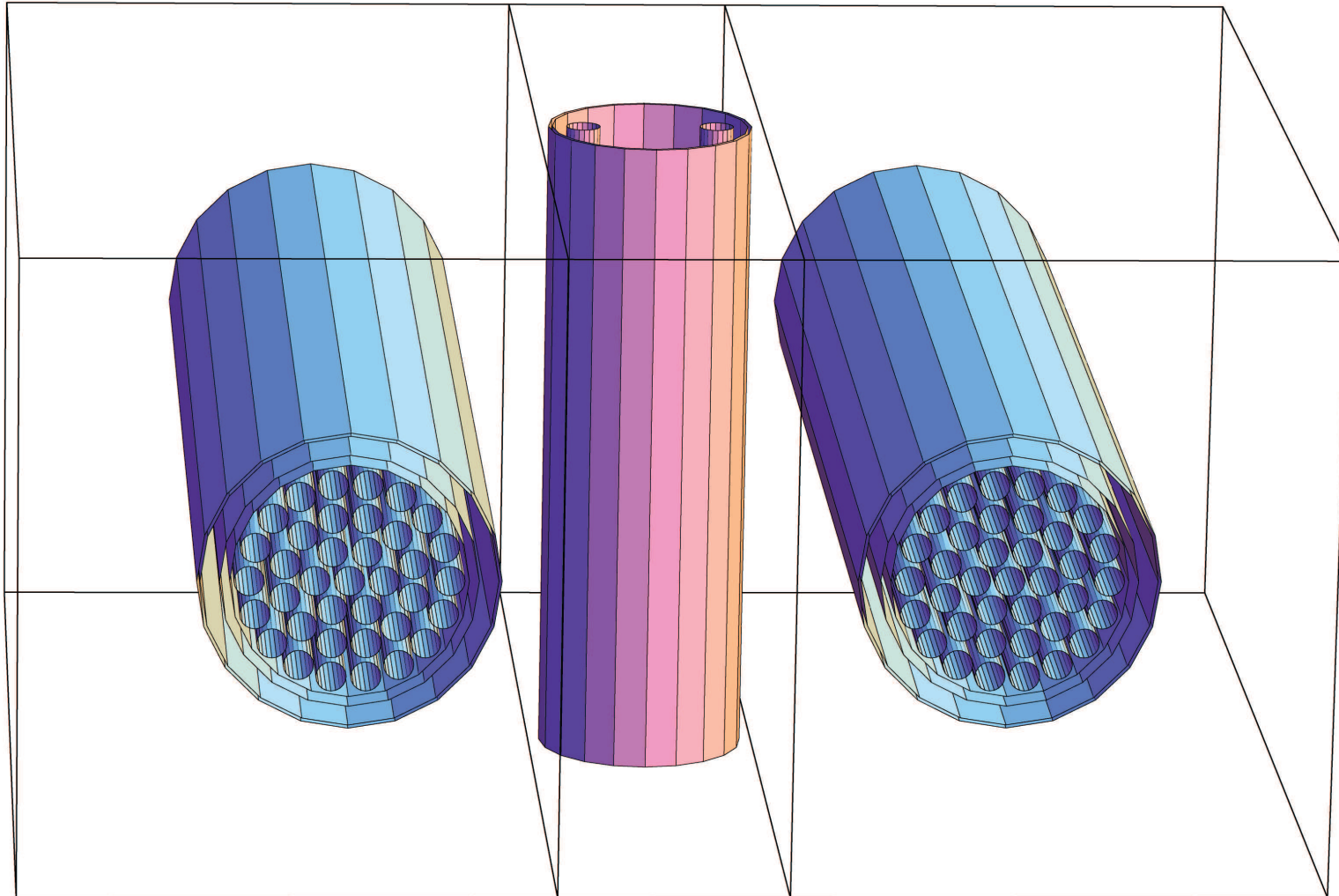
# *Géométrie du calcul de réseau*

**cluster CANDU (discrétisation G2S + SALT)**



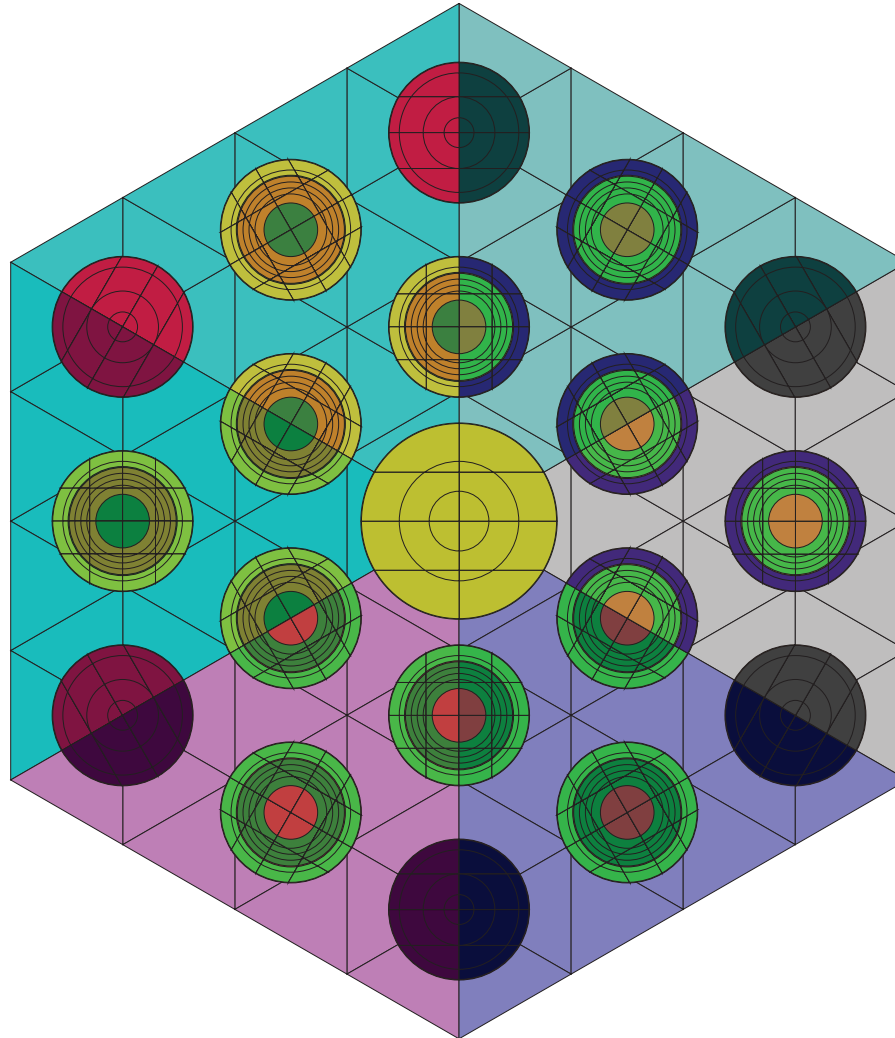
# *Géométrie du calcul de réseau*

## Mécanisme de réactivité CANDU (discrétisation NXT)



# *Géométrie du calcul de réseau*

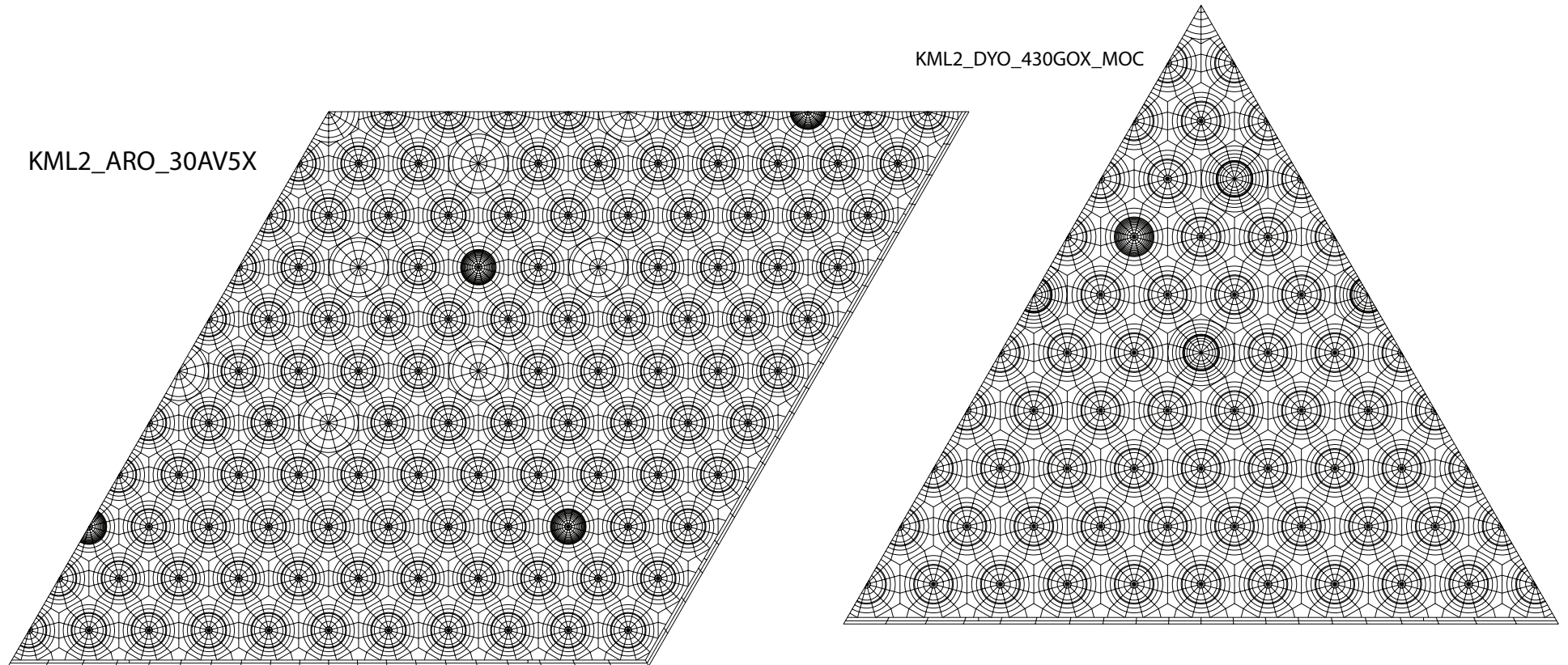
**Réacteur à haute température (discrétisation NXT)**





# Géométrie du calcul de réseau

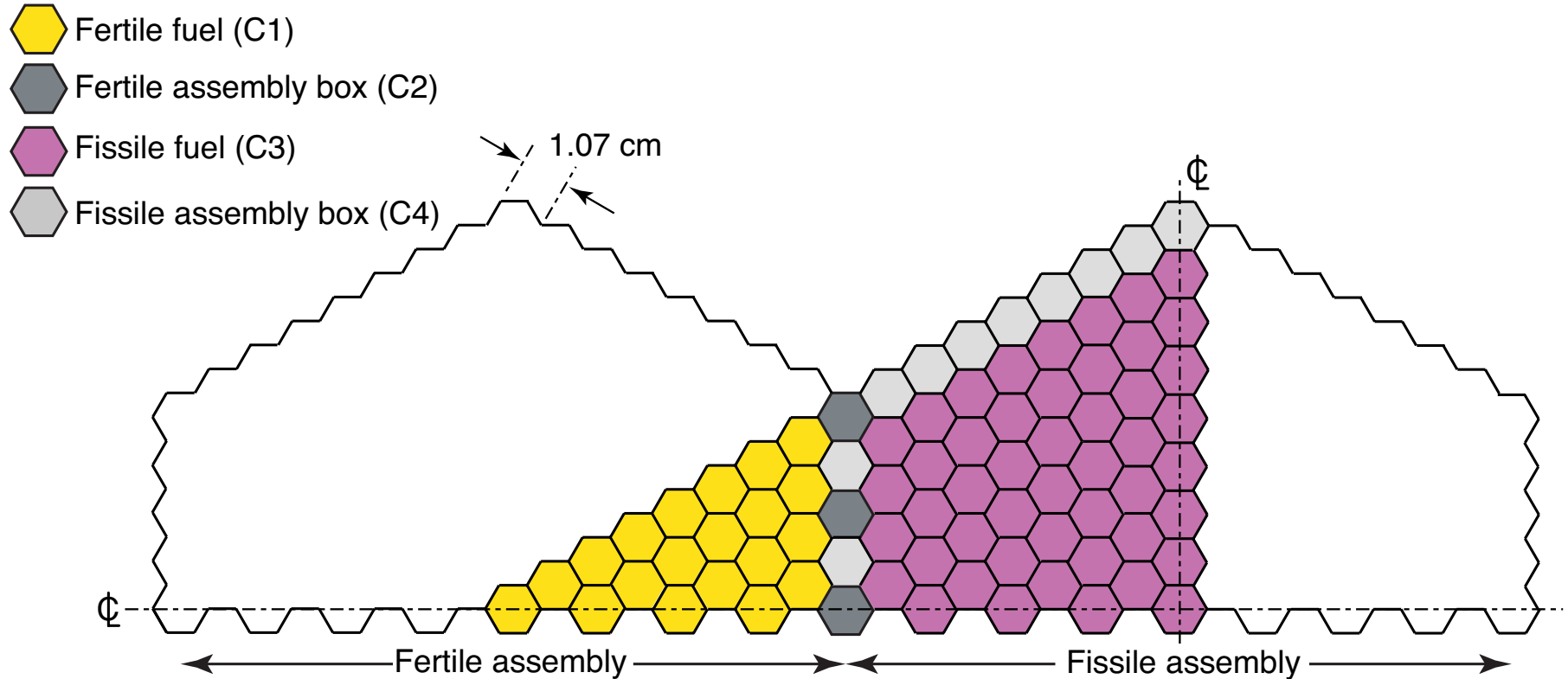
## Géométrie d'assemblage VVER (discrétisation GLOW + SALT)





# Géométrie du calcul de réseau

## Réacteur rapide à caloporteur sodium (discrétisation SYBILT)



# Logiciels de simulation “coeur-entier”

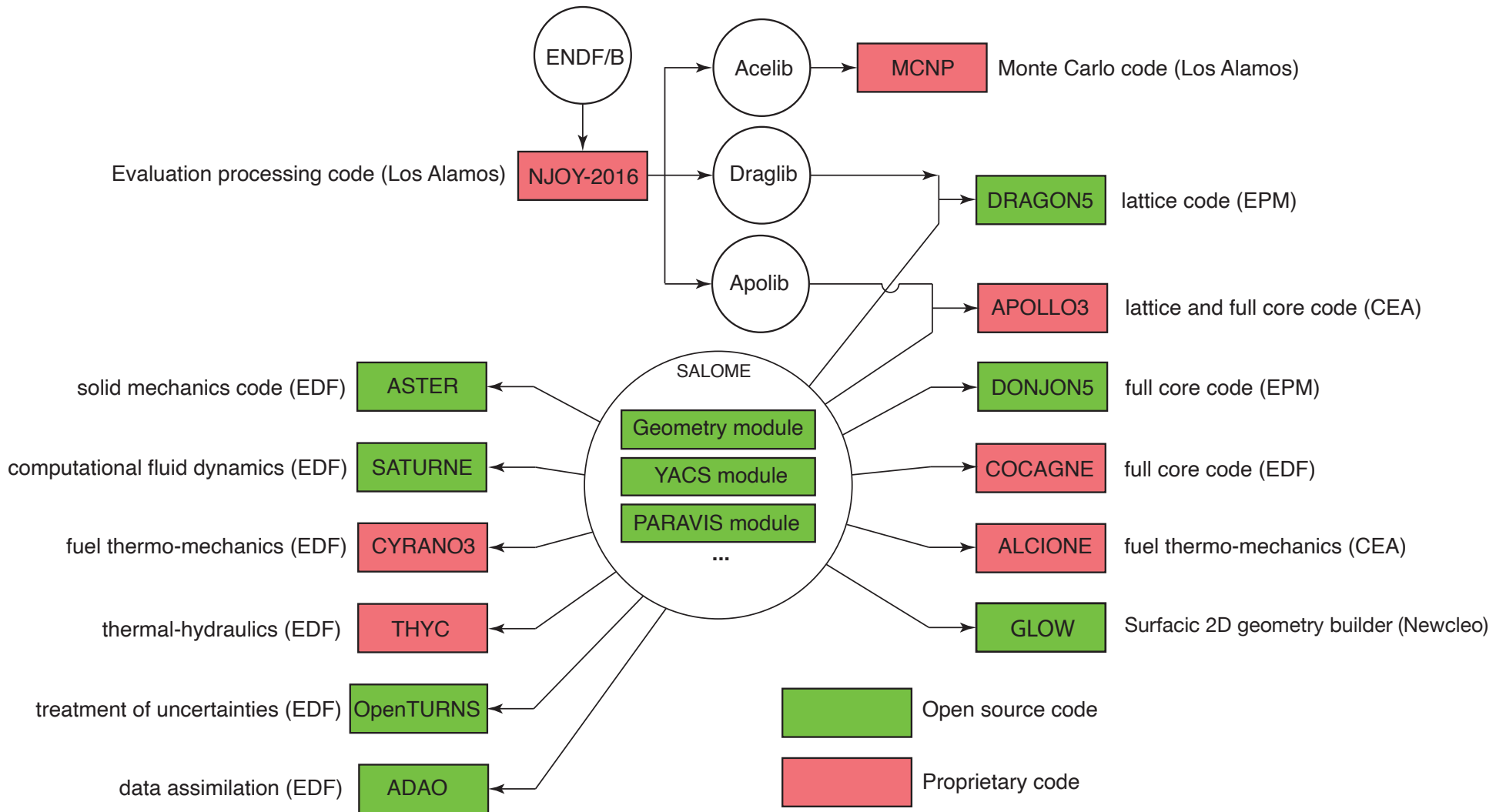
## □ Solveurs “coeur-entier”

- ❖ solution de l'équation de diffusion neutronique
- ❖ solution de l'équation  $P_N$  simplifiée
- ❖ solution de l'équation  $S_N$

## □ Outils de simulation auxiliaires (accastillage)

- ❖ interpolation multiparamètre d'une base de données nucléaires
- ❖ micro-évolution d'isotopes particuliers (Xe, Sm, etc.)
- ❖ contrôle critique du Bore
- ❖ thermo-hydraulique simplifiée (régime permanent et transitoire)
- ❖ gestion des mécanismes de réactivité (barres de contrôle)
- ❖ simulation du rechargement combustible
- ❖ reconstruction fine de puissance dans les assemblages
- ❖ cinétique espace-temps en 3D et calcul de perturbation généralisé
- ❖ capacité de concevoir des **schémas de calcul** (cycles de burnup, scénarios d'accident, etc.)

# L'écosystème SALOME



## Plateformes de calcul industriel (France)

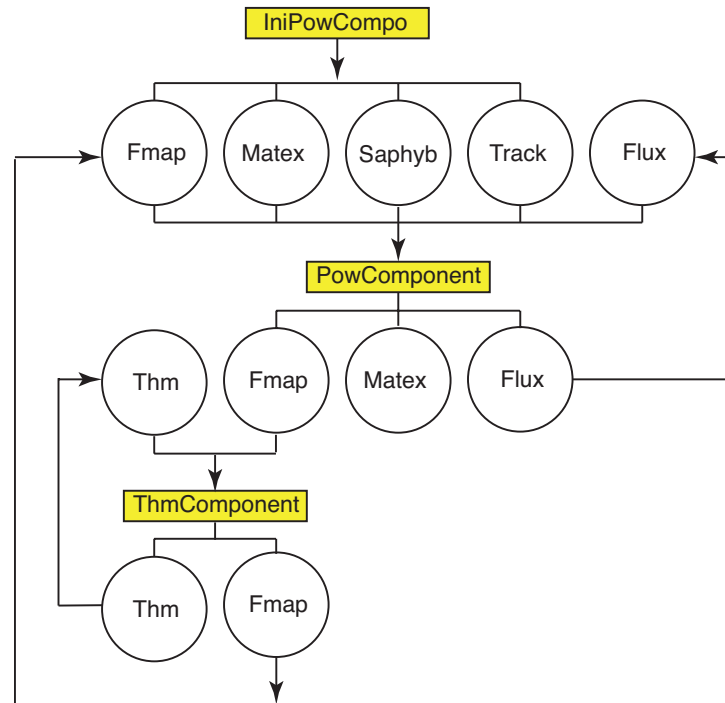
- ❑ Les plateformes de production actuelles pour l'ensemble des REP en France (y compris l'EPR) sont Science V2 et Cassiopée.
- ❑ Le projet ODYSSEE est une initiative en cours pour combiner ARCADIA et Andromède dans un cadre unique.
- ❑ Le projet NEMESI est une plateforme basée sur les outils du futur pour supporter les PWR (y compris l'EPR) et les VVER.

	Areva		EDF		EDF/Framatome	Framatome
Framework	Science V2	ARCADIA	Cassiopée	Andromède	Odyssee	NEMESI
Lattice code	APOLLO2-F	APOLLO2-A	APOLLO2.5	APOLLO2.8	APOLLO2.8	APOLLO3
Computational scheme	depleting $S_n$ (2 levels)	PIJ/ $S_n$ /MOC (3 levels)	PIJ-99 groups (1 level)	REL-2005 (2 levels)	REL-2005/amélioré (2 levels)	REL-2005/amélioré (2 levels)
Full-core simulation code	SMART (nodal/NEM)	ARTEMIS (nodal/NEM)	Coccinelle (nodal)	Cocagne (Raviart-Thomas)	Cocagne (Raviart-Thomas)	MINOS3 (Raviart-Thomas)
Reactor types	PWR	PWR	PWR	PWR	PWR	PWR / VVER

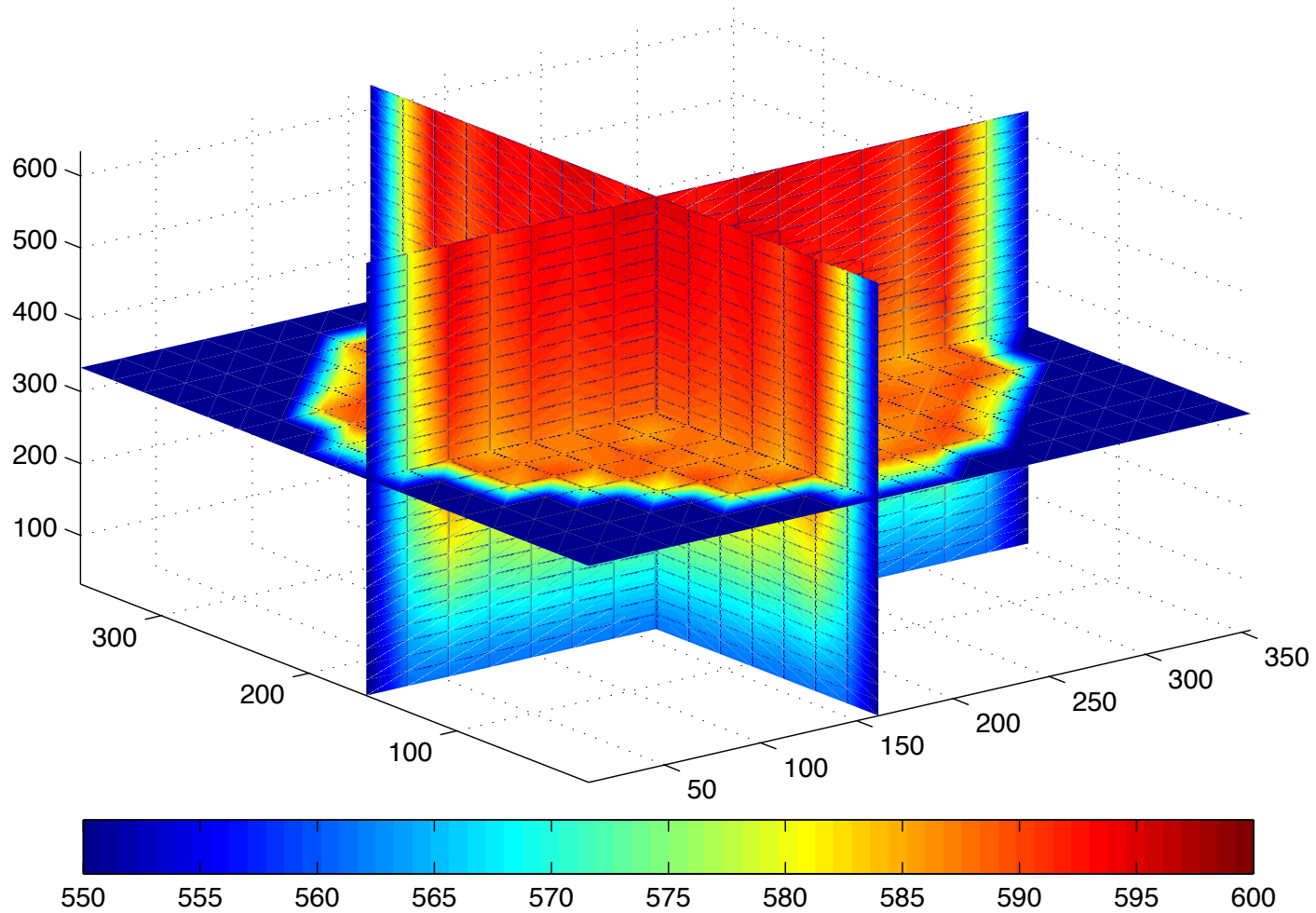
# Calculs multiphysiques dans DONJON5

La boucle while est formée de trois procédures CLE-2000

- ❑ **IniPowCompo.c2m**: Initialisation du calcul et entrée des conditions initiales. L'objet Fmap contient la distribution de puissance, burnup, température combustible température caloporteur et densité caloporteur.
- ❑ **PowComponent.c2m**: Calcul du flux neutronique et de la puissance par la méthode des éléments finis dans DONJON5
- ❑ **ThmComponent.c2m**: Calcul de thermo-hydraulique simplifié réalisé sur chaque assemblage en conditions stationnaires



# Calculs multiphysiques dans DONJON5



## *Thèmes de recherche à l'IGN*

- **Deux types de sujets de recherche (aucune recherche expérimentale en physique des réacteurs à l'IGN):**
  - ❑ **Études et conception de schémas de calcul (computational schemes)**
    - ❖ Étude de concepts de réacteurs de différentes filières et mise au point de procédures de calcul automatisées (encapsulées). Les schémas de calcul sont programmés principalement en langage CLE-2000 et exploités en Python3.
  - ❑ **Développement de logiciels de calcul**
    - ❖ Mise au point de logiciels destinés au calcul de réseau ou au calcul de coeur entier. Les logiciels de calcul sont programmés principalement en Fortran (Fortran-2003) avec certaines parties en ANSI-C. Nous prévoyons utiliser Python3 pour la conception d'interfaces physiques et pour la supervision multi-physique.
- **NOTE:** Les mémoires et thèses co-dirigées par Alain Hébert peuvent comporter un stage industriel de 6 mois.

# Commanditaires de l'IGN

## Sociétés européennes

### ❑ EDF/R&D (3 ententes pour des M. Sc. A.):

- ❖ Prototypage rapide d'équivalences SPH et nodales dans l'environnement CARABAS d'ODYSSEE (Thomas Schefler)
- ❖ Prototypage rapide d'un modèle de fuites prenant en compte les effets d'environnement (Elouan Madic)
- ❖ Amélioration du schéma 2-niveaux de CARABAS par prototype rapide (à attribuer pour juin 2026)

### ❑ CALOGENA (M. Sc. A.)

- ❖ Modélisation du coeur CALOGENA (Damien Brasseur)

### ❑ NEWCLEO (M. Sc. A.)

- ❖ Modélisation du coeur ALFRED (non attribué)

### ❑ FRAMATOME (Ph. D.)

- ❖ Modélisation des réflecteurs pour les schémas de calculs industriels et de référence: application des équivalences en mode non-fondamental (Sami Machach)



# Commanditaires de l'IGN (suite)

## Organismes canadiens

### ❑ CNSC (Autorité de sûreté)

- ❖ Investigation of a SMR based on the High Temperature Gas Reactor concept (M.Sc.A.) (non attribué)
- ❖ Investigation of a core based on the Sodium Fast Reactor concept (Ph. D.) (Bowen Cui)
- ❖ Include SMR characteristics to the CLASS scenario simulator (Ph.D.) (Ivan Trancart)

### ❑ NRCAN (Fonction publique)

- ❖ Investigation of a SMR based on the Boiling Water Reactor concept – neutronics (Ph.D. ) (Raphaël Guasch)
- ❖ Investigation of a SMR based on the Boiling Water Reactor concept – thermalhydraulics (M.Sc.A.) (Clement Huet)
- ❖ Investigation of a SMR based on the Molted Salt Reactor concept (M.Sc.A.) (non attribué)
- ❖ Simulation of SMR–specific supply chains using CLASS (Ph.D.) (non attribué)