

# Machine learning pour l'étude de réacteurs nucléaires et de scénarios électronucléaires

Marc ERNOULT, IPNO-DR/PACS

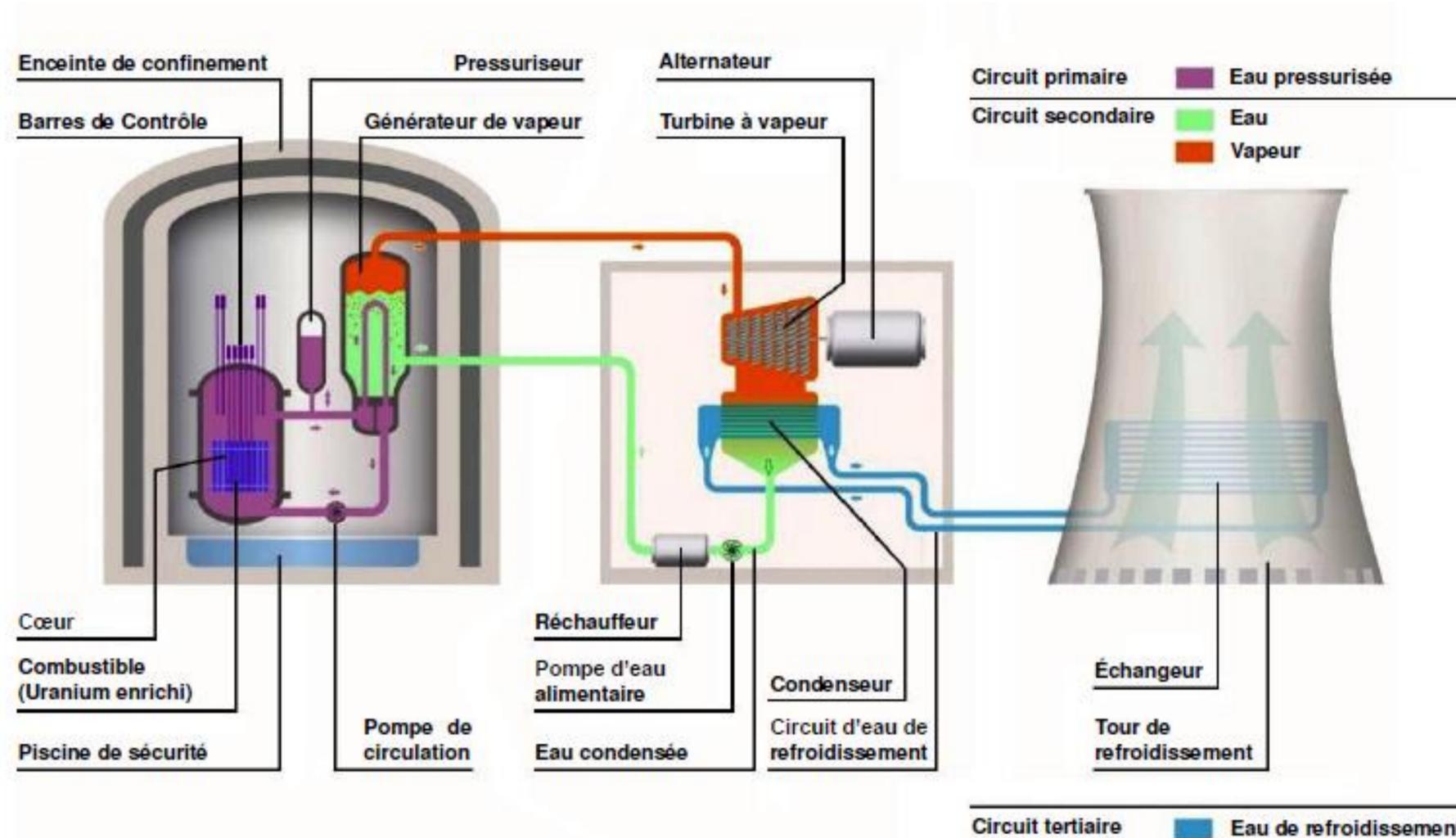
Avec l'aide de :

- Xavier DOLIGEZ (IPNO)
- Nicolas THIOLLIERE (Subatech)

## Plan de la presentation

1. Réacteur nucléaires
2. Scénarios Électronucléaires
3. CLASS
4. Le choix du Machine-Learning?
5. Utilisation des ANN dans CLASS
6. Limitations des ANN dans les meta-modèles
7. Nouvelles perspectives ouvertes par le ML

# 1.a Réacteurs nucléaires



Systeme à l'équilibre.

Statistique :

$10^{14}$  Neutron.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>

$10^{20}$  Fission.s<sup>-1</sup>

Jusqu'à 1400 isotopes

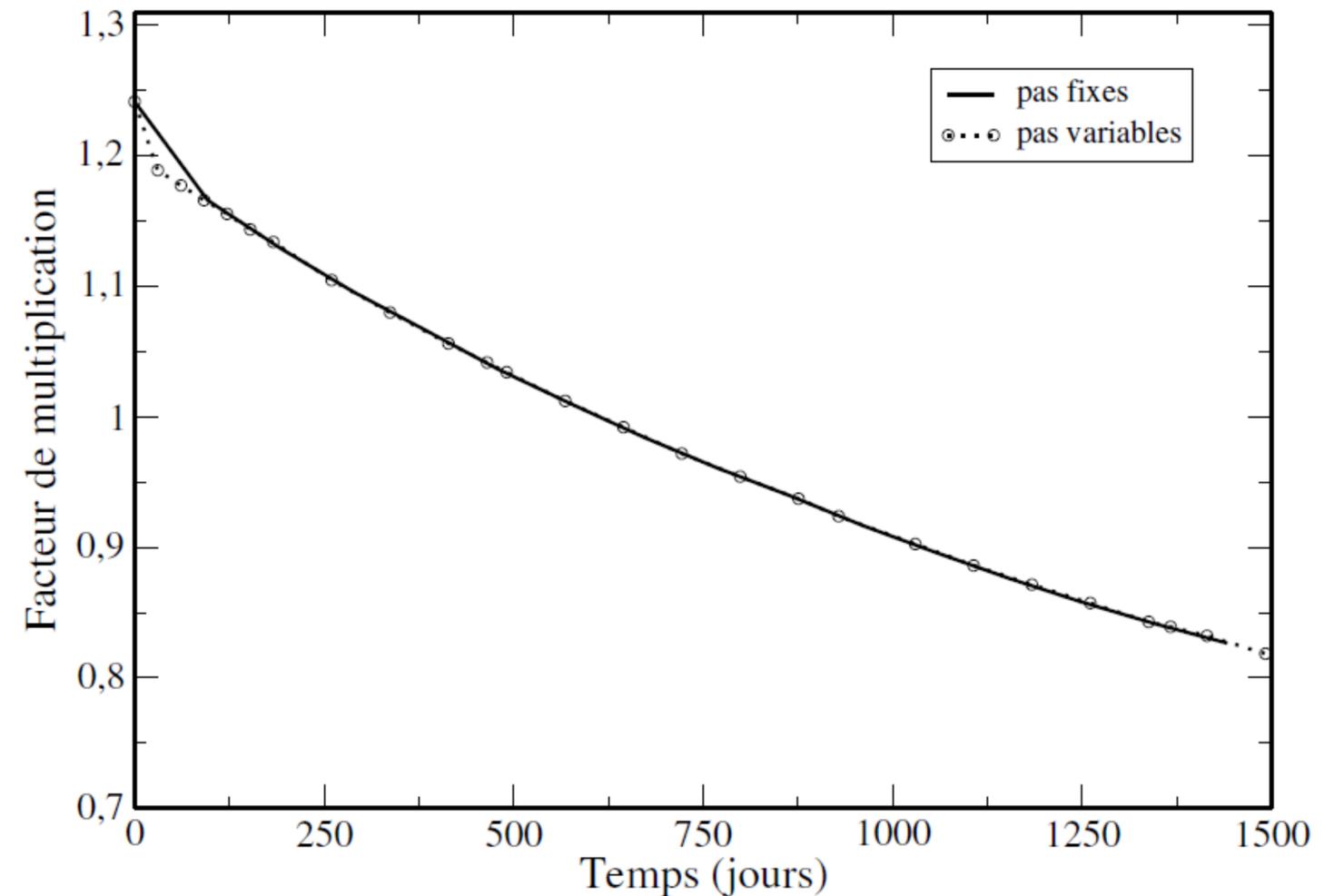
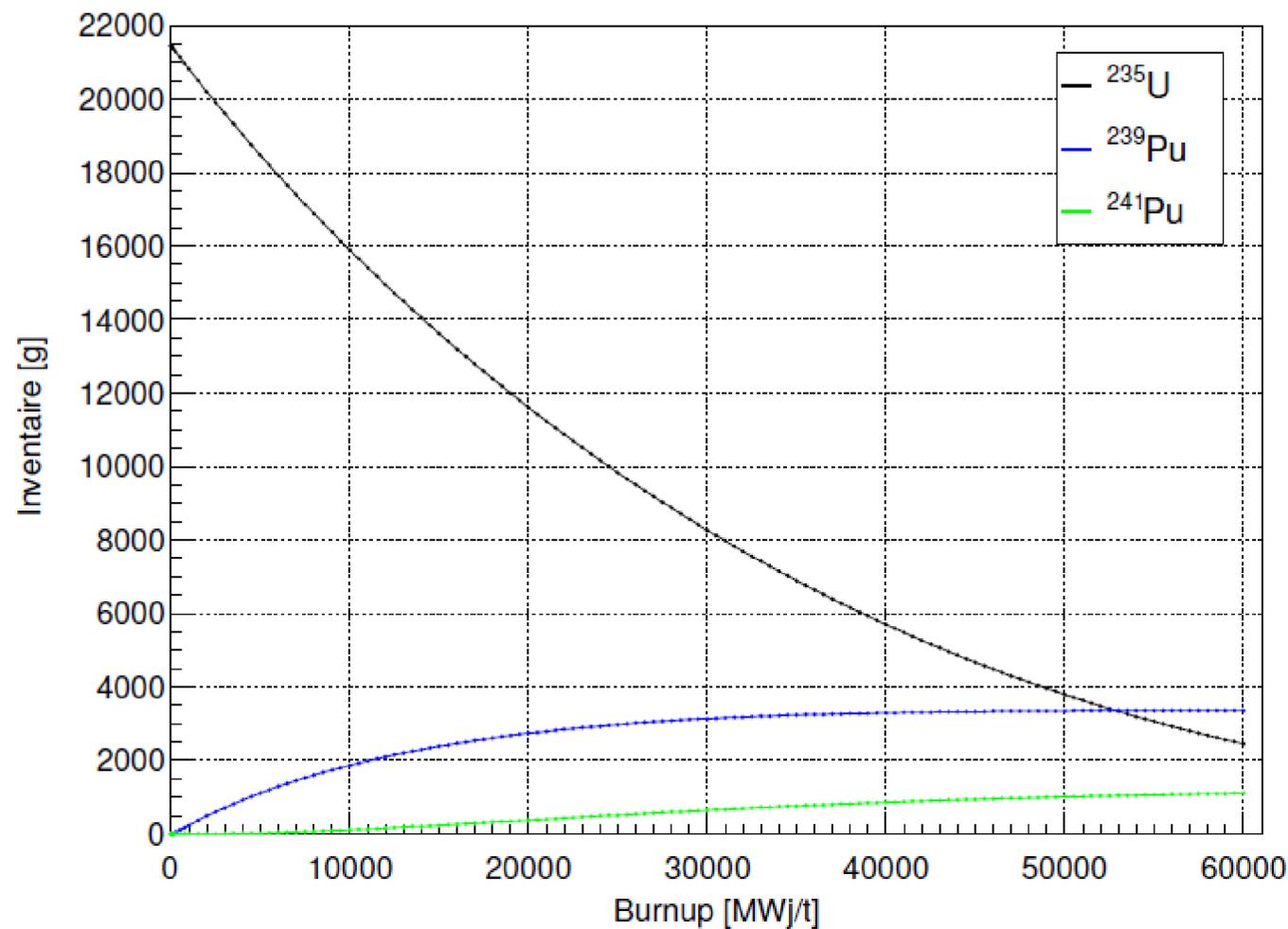
Codes dédiés développés depuis plusieurs dizaines d'années

Haut coût de calcul : plusieurs heures.cpu

# 1.b Physique des Réacteurs

Domaine scientifique très large : neutronique, thermohydraulique, cinétique, corrosion...

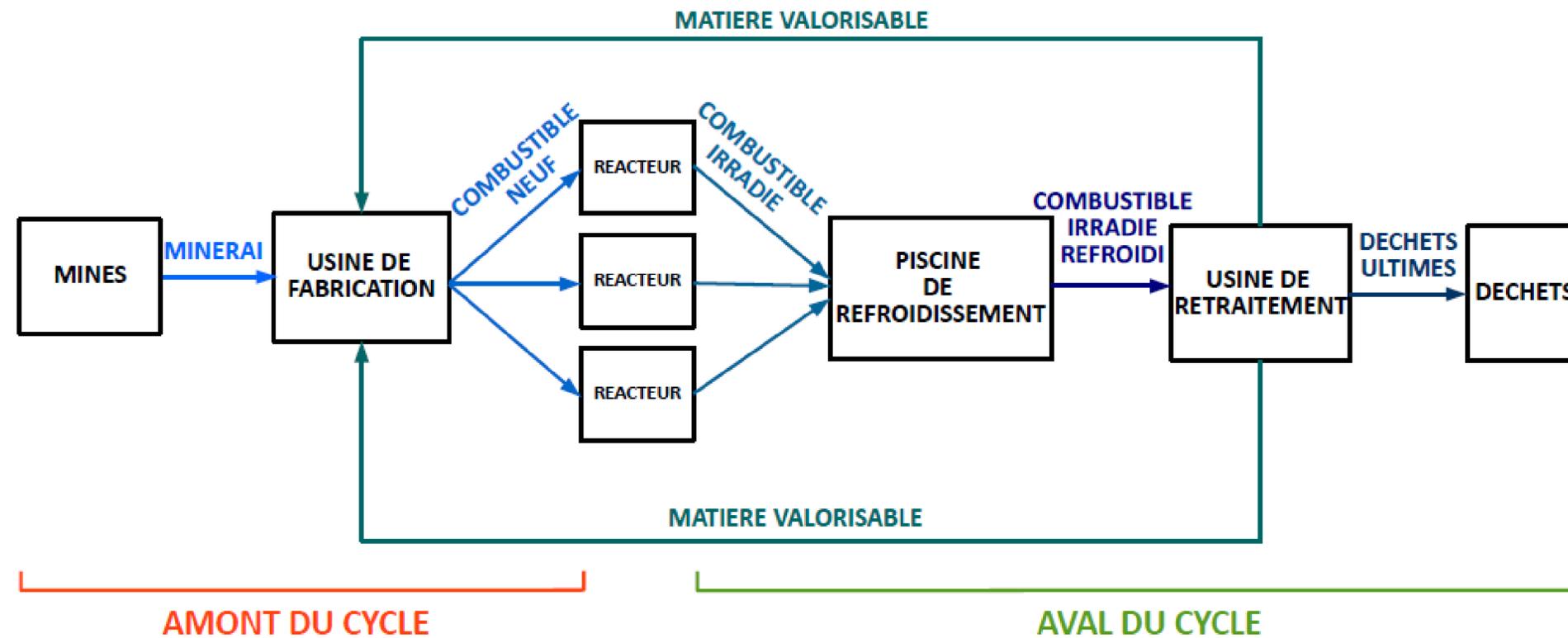
Neutroniciens, on se concentre sur 2 observables :



*Courtesy of A.Somaini, 2017*

# 1.b Cycle du combustible

CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE FERME

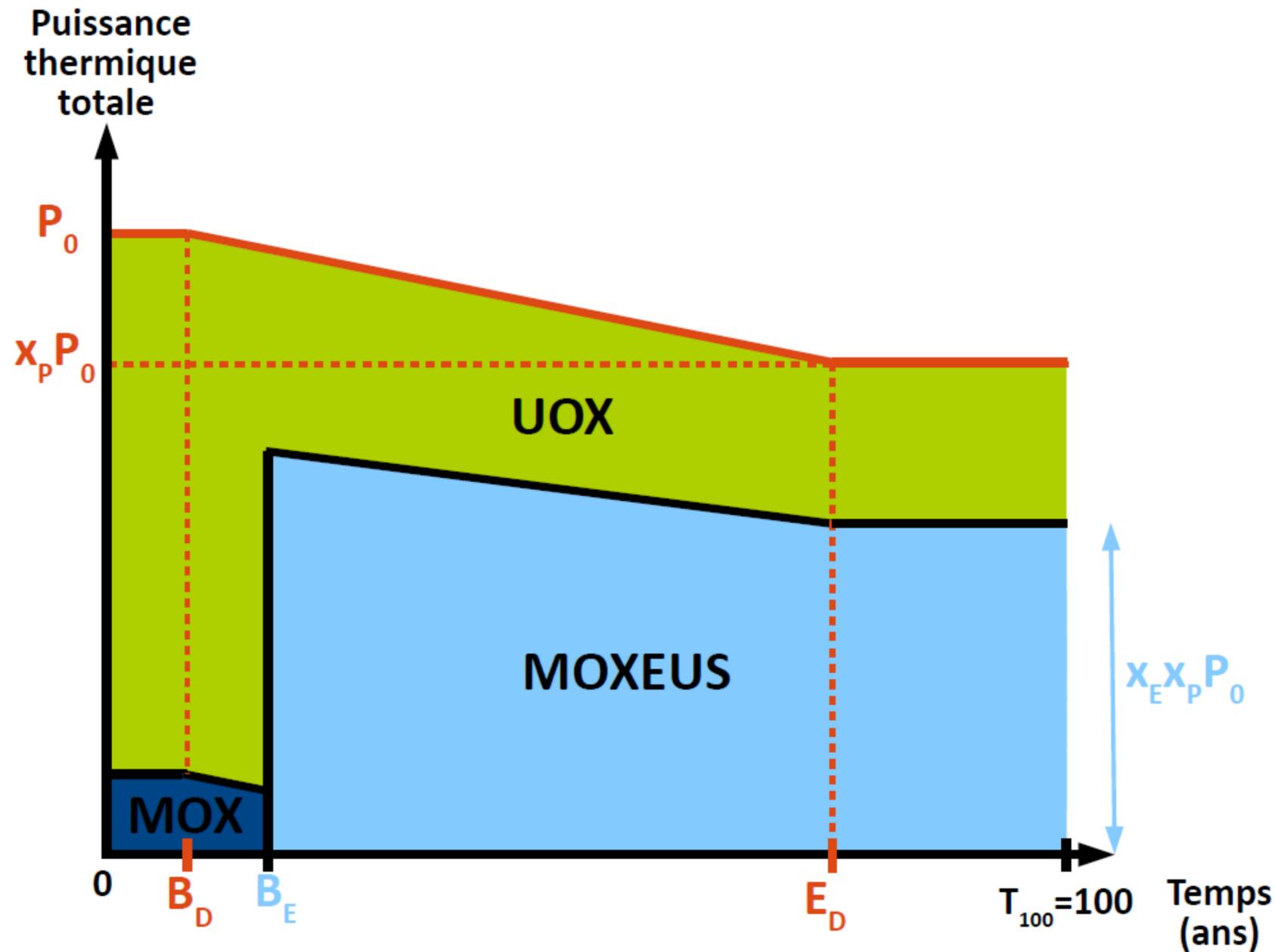


Nombreuses installations :

- Réacteurs
- Usine de Fabrication
- Piscine de refroidissement
- Usine de retraitement
- Centre d'entreposage des déchets

*Courtesy of F. Courtin, 2017*

# 2. Scénarios électronucléaires



Evolution d'un cycle du combustible dans le temps pour analyser l'effet d'un changement :

- Déploiement nouvelle tech
- Changement de stratégie de recyclage
- Changement de gestion du combustible

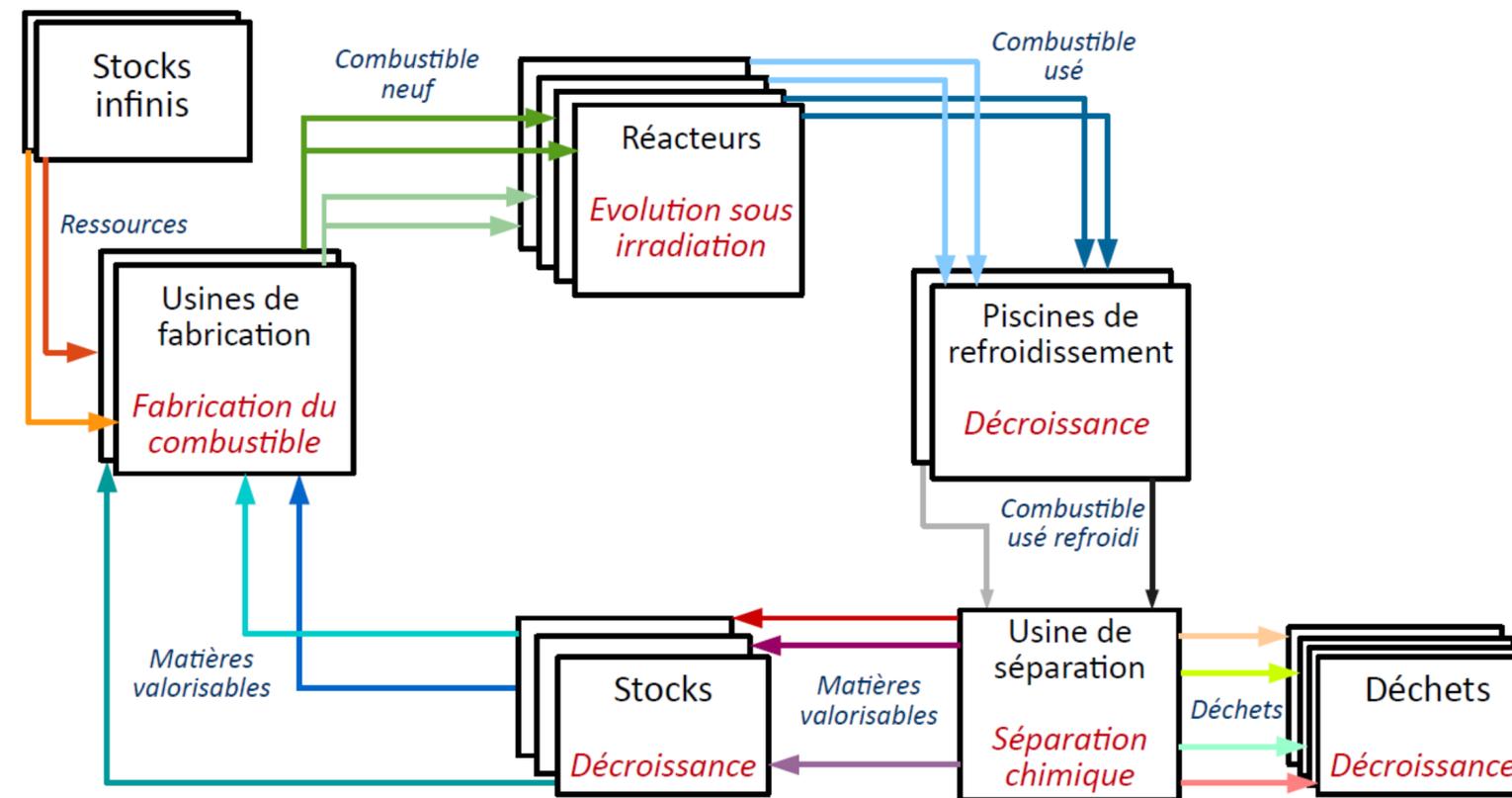
Grandes échelles :

- 2 à 100 réacteurs
- 50 à 300 ans

*Courtesy of F. Courtin, 2017*

# 3.a CLASS : code de scénario

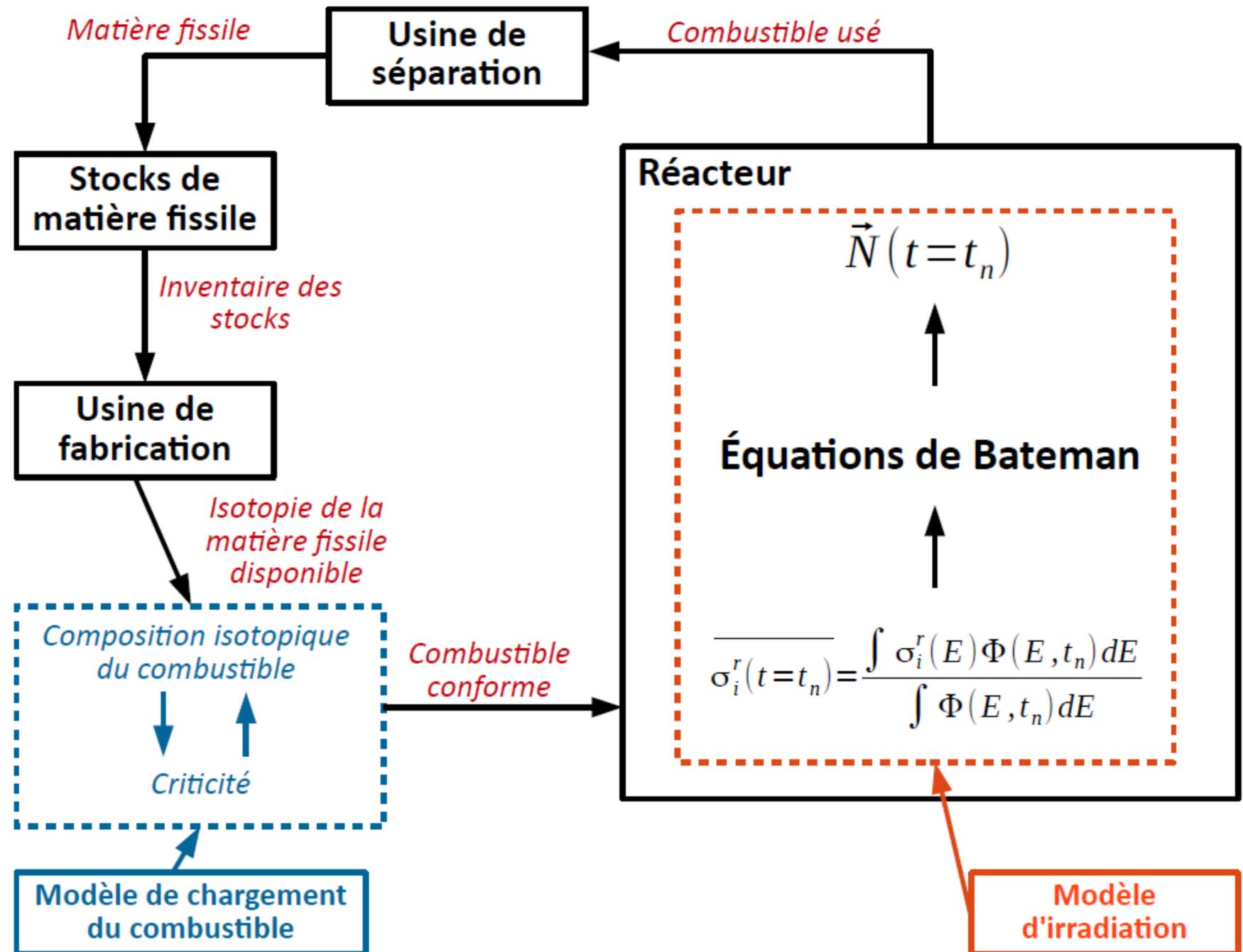
CLASS (Core Library for Advanced Scenario Simulation) : outil de simulation dynamique du cycle  
Développé depuis 2011 à l'IN2P3 (Subatech, IPN Orsay, LPSC) en collaboration avec l'IRSN (LNC).



*Courtesy of F. Courtin, 2017*

Simulation de la physique gouvernant l'évolution des matières nucléaires dans le cycle au cours du temps

# 3.b CLASS : modèles



Décroissance :

- solvable analytiquement

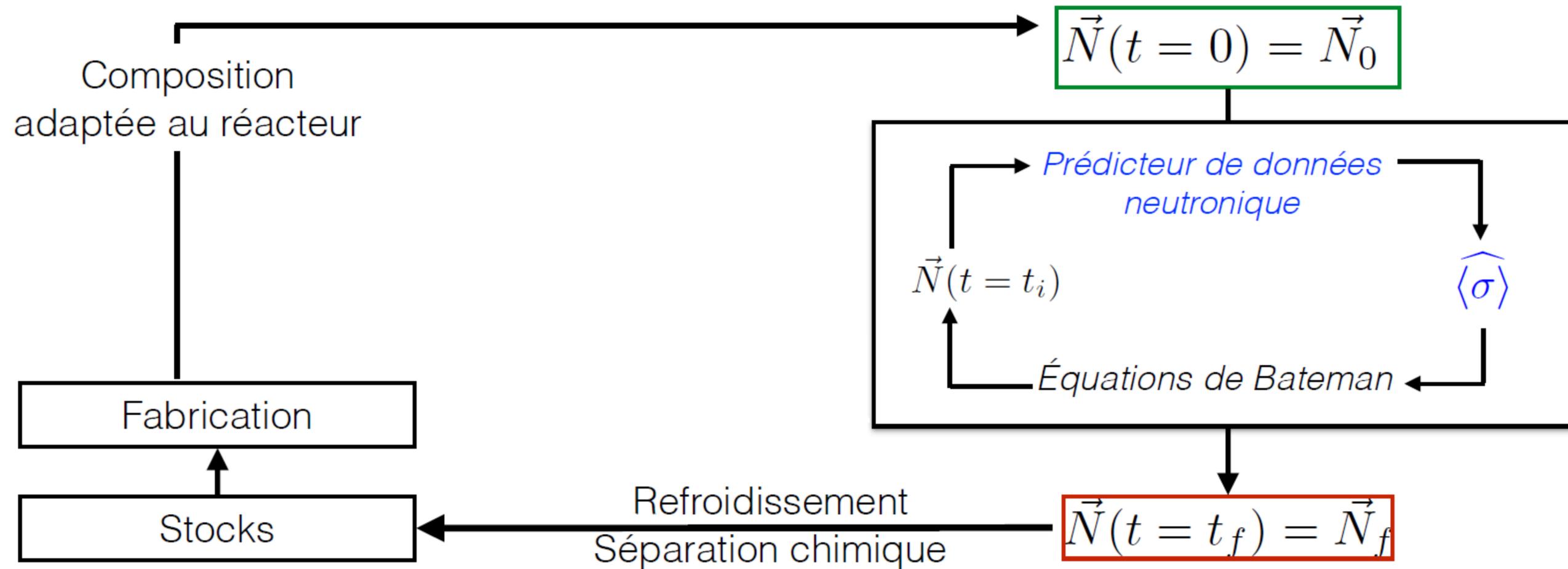
Irradiation & Fabrication :

- besoin de développer un modèle

Modèle d'irradiation

Courtesy of F. Courtin, 2017

# 4.a Modèle d'irradiation : struc



Courtesy of B. Leniau, 2015

seulement 3 type de XS (fission, cap, n2n) pour facilité d'implémentation

suffisant pour 1% sur les inventaires actinides et 5% sur les PF d'interet pour la chaleur résiduelle

# 4.b Modèle d'irradiation: Cost

Code dédié à la simulation de l'irradiation : SMURE , mature et précis

MAIS

Simulation : 4h.proc même en utilisant des approximations de modélisations fortes (créant des biais de qqes %)

OR

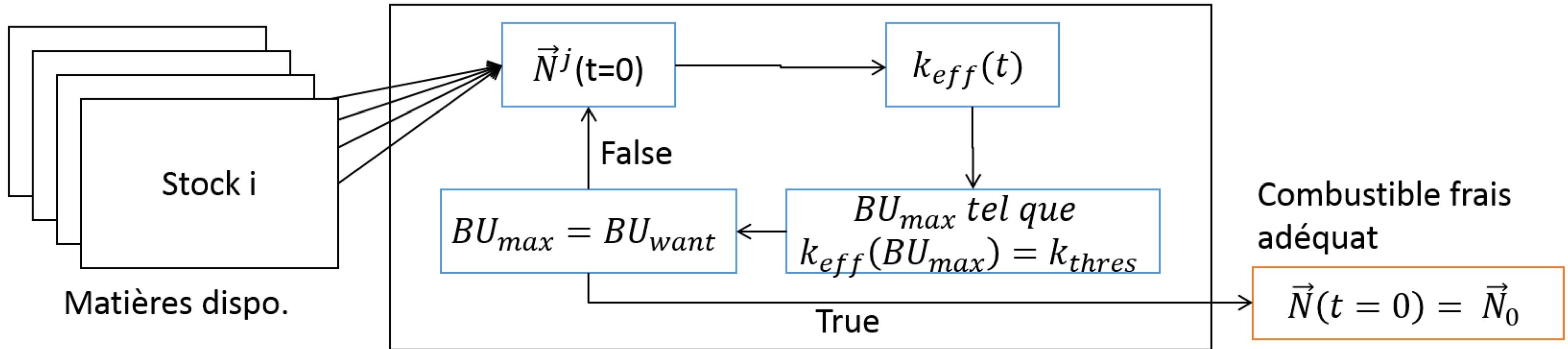
Irradiation dans 1 scenario :

- Temps d'irradiation ~ 5 ans
- $200/5 = 40$  irradiations par réacteurs
- 60 réacteurs =>  $40*60 = 2400$  irradiations par scénarios

De plus : recyclage => dépendance temporelle : difficile de paralléliser

$$1200*4 = 4800h = 200 \text{ jours}$$

# 4.b Modèle de fabrication : struc



On ajuste les % fissiles par dichotomie

Des modèles à 2 paramètres ont été développés (cf thèse de L. Tillard, 2019)

# 4.b Modèle de fabrication : Cost

Pour fabriquer un combustible qui respecte les conditions de sûreté et d'opérabilité, il faut des informations sur l'ensemble de l'irradiation, jusqu'à la fin.

Relation non linéaire et pas possible de formule analytique => dichotomie

=> entre 3 et 5 irradiation simulée :  $4 \times 4h \Rightarrow 16h$ .processeur par point

OR

Combustibles fabriqué dans un scenario :

- Temps d'irradiation ~ 5 ans
- $200/5 = 40$  combustibles par réacteurs
- 60 réacteurs =>  $40 \times 60 = 2400$  combustibles créés par scénarios
- Optimisation possible, mais recyclage => au moins 250 combustibles uniques

$$240 \times 16 = 3840h = 160 \text{ jours}$$

**TOTAL :  $160+200 = 360$  jours.processeurs. Pour 1 trajectoire**

**Même sur CC et qqes centaines de processeurs => très compliqué**

# 4.c Meta- Modèles : ML

Conclusion : il faut des meta-modèles.

Implémentation la plus simple :

- Recettes : prend les points les plus proche dans une database

Mais : nombre de recette demandé augmente vite + Très dur de contrôler la précision

## En 2015, CLASS a choisi les Réseaux de Neurones

**Solution technique** : multilayer perceptron via TMVA (Toolkit for Multivariate Data Analysis with ROOT)

Choix partagé par les autres codes Réseau de neurones solution de choix répandu :

- COSI (CEA, depuis la thèse de G. Krivtchik), 2014
- Tr\_Evol (CIEMAT, depuis la thèse de A. Villacorta) 2019,
- Josette (Budapest University of Technology, thèse de M. Halasz) 2018

# 5.a ANN dans CLASS : Datasets

LHS : 250 à 1000 simulations pour l'entraînement

Autre LHS 100 à 200 points pour le test

$w_{Pu}$	$^{238}Pu$	$^{239}Pu$	$^{240}Pu$	$^{241}Pu$	$^{242}Pu$
0	0.5	10	10	0	1.5
16	8	80	40	25	35

Bornes de l'échantillonnage (en %) sur la quantité totale de Pu et la proportion des différents isotopes

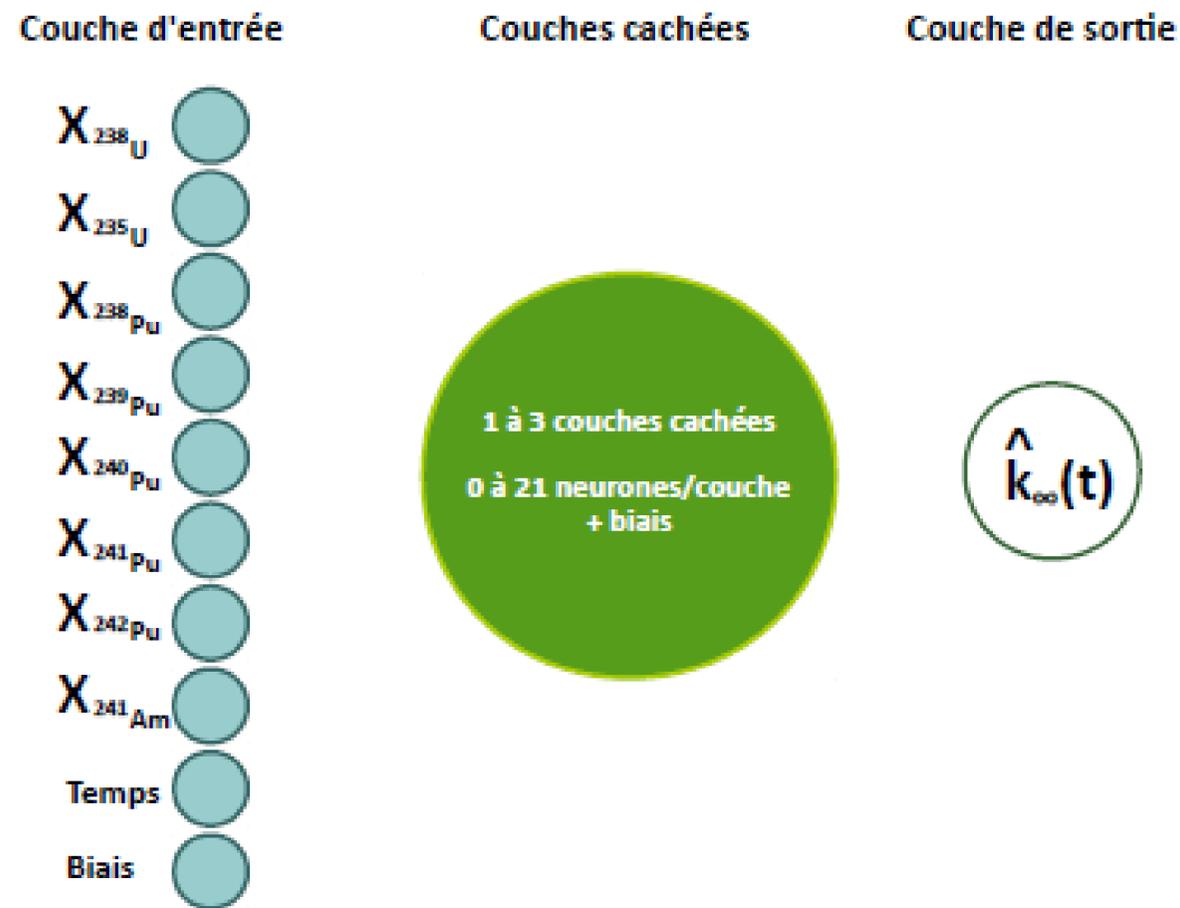
Même datasets pour Irradiation et fabrication

*Courtesy of F. Courtin, 2017*

# 5.b ANN dans CLASS : MLP

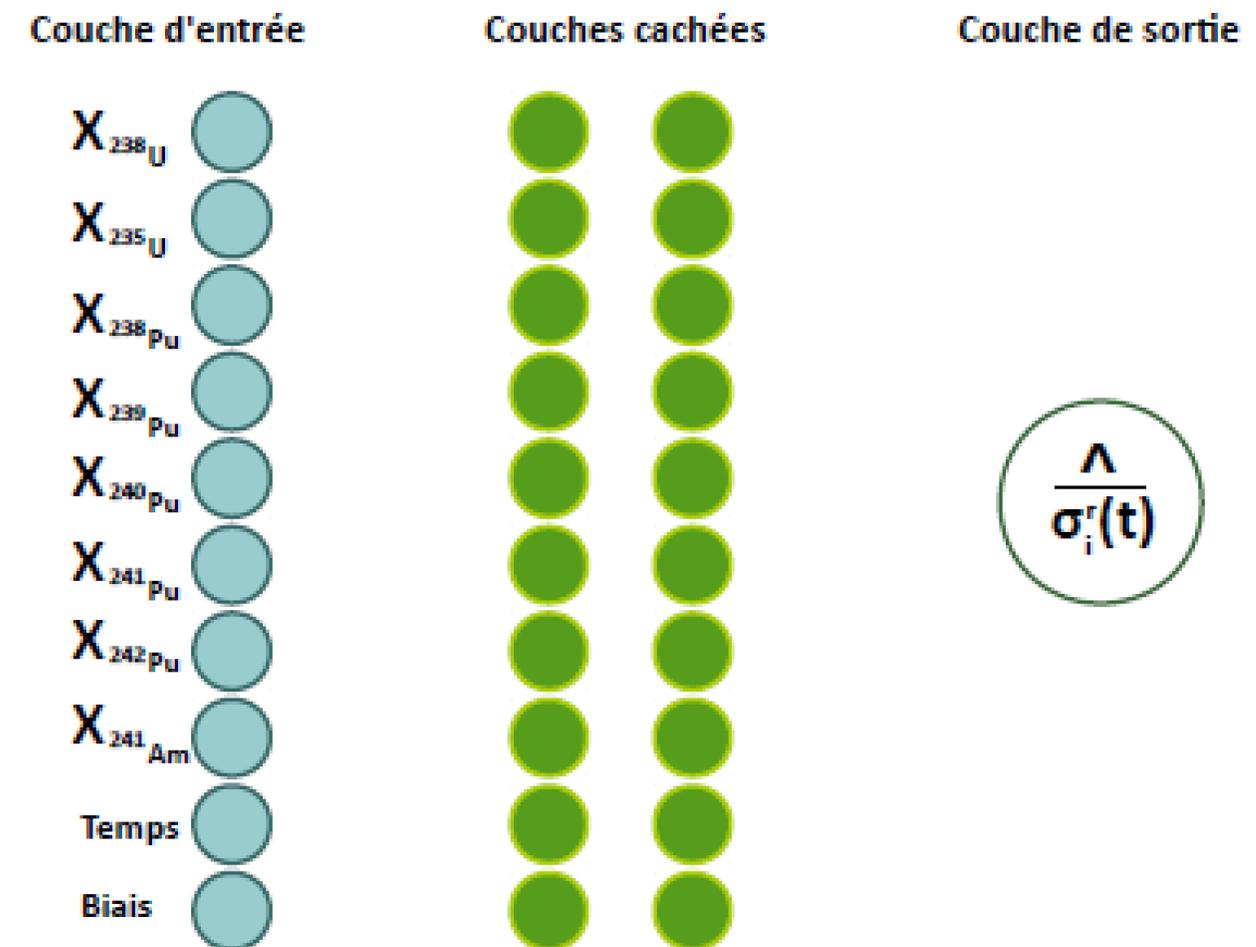
Pour le modèle de fabrication

- 1 MLP pour le k fin de cycle



Pour le modèle d'irradiation

- 1 ANN par XS ~ environ 300 ANN



Courtesy of F. Courtin, 2017

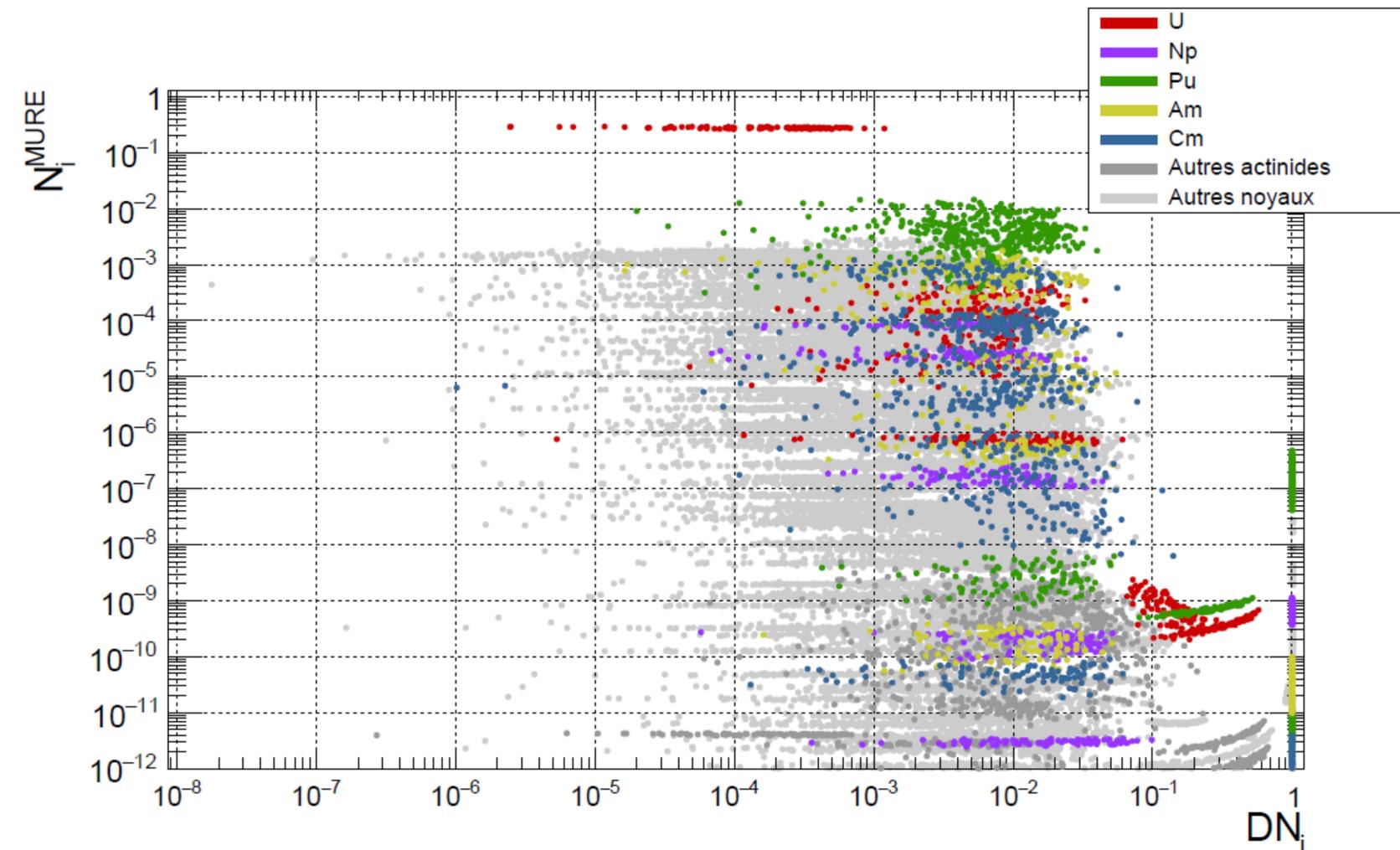
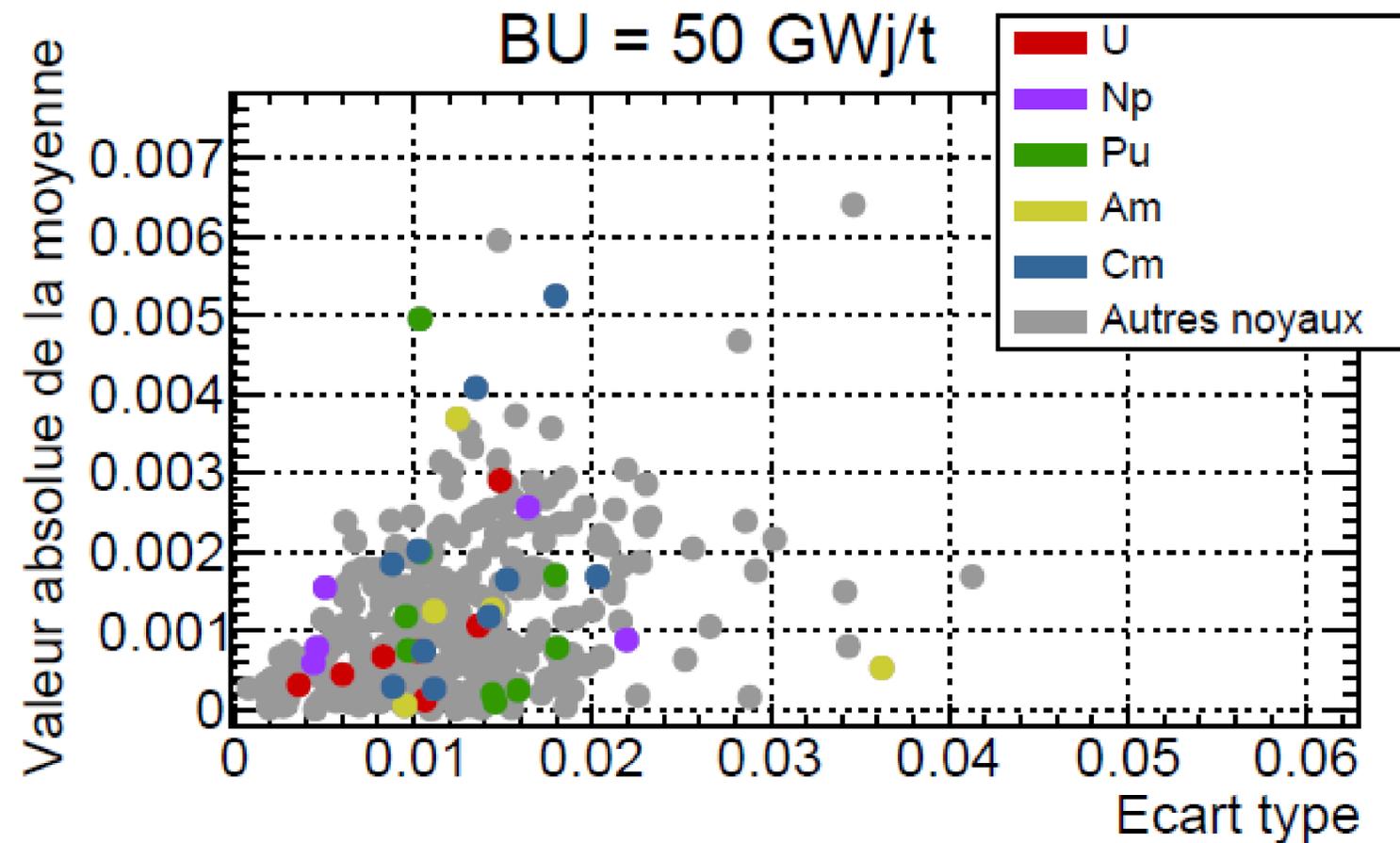
# 5.c ANN dans CLASS : Perf Irr

Réseau de neurone

Moins d'erreur que les BDD

Modèle d'Irradiation complet

Erreurs inférieures aux erreurs de modélisations

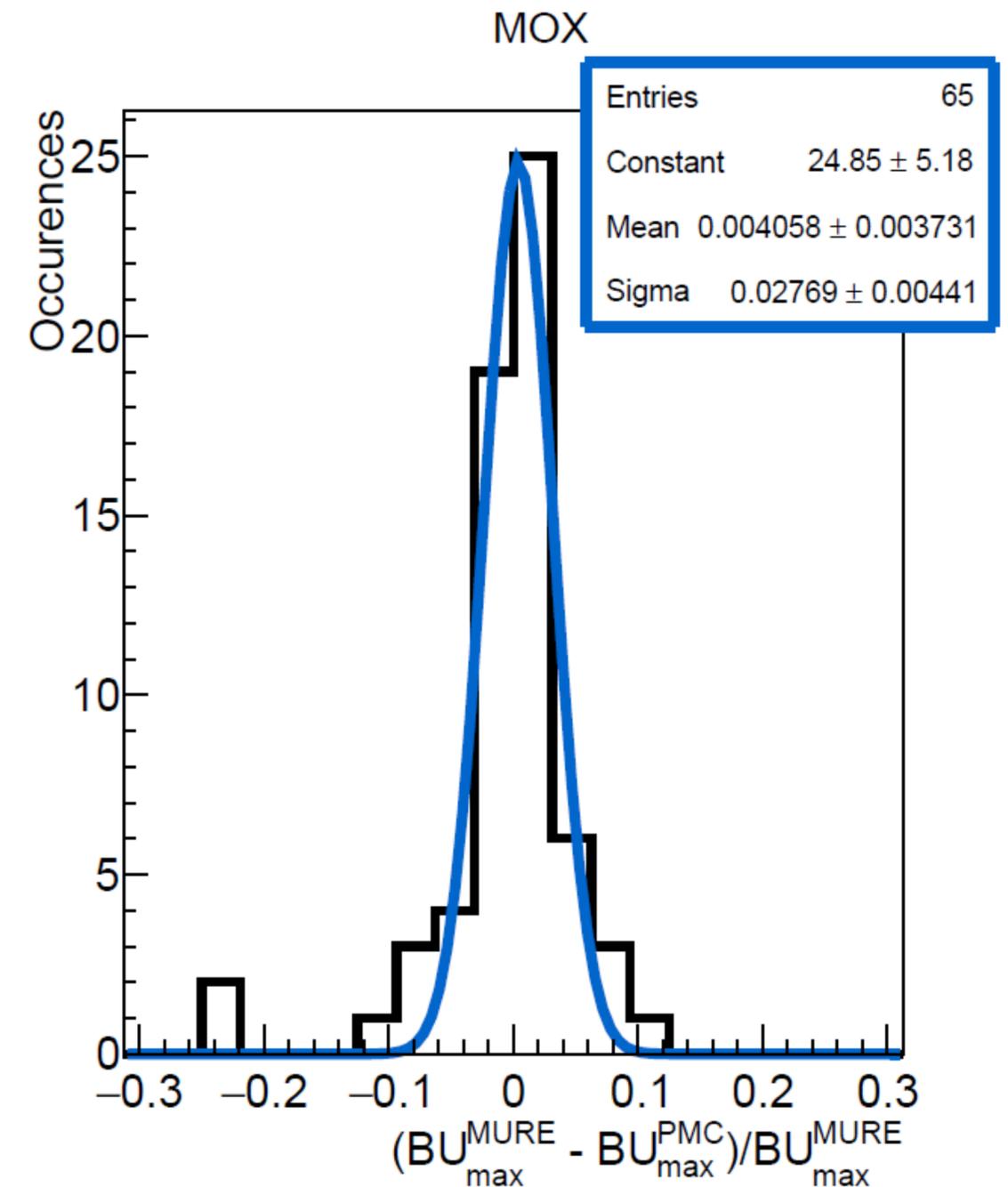
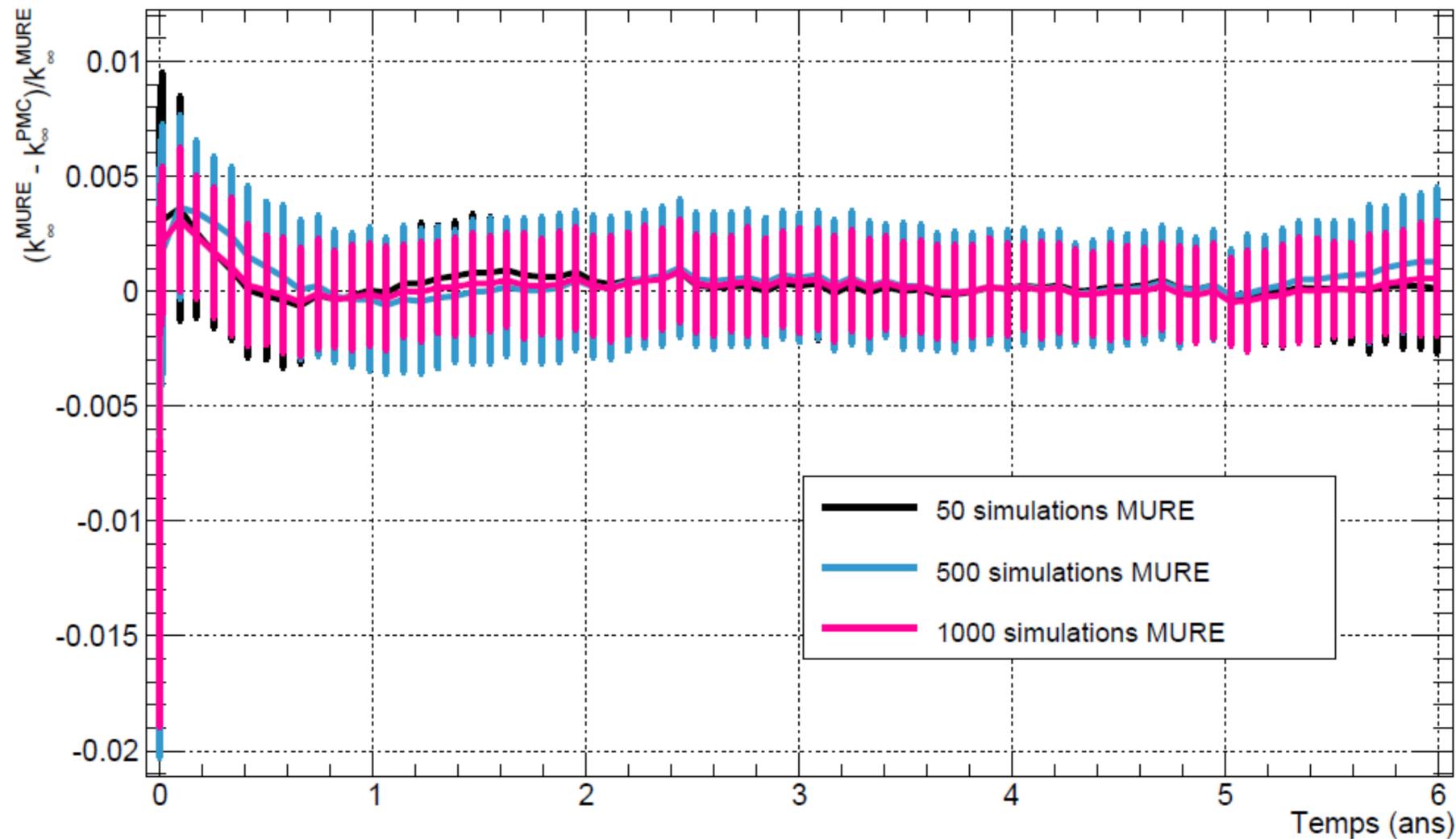


# 5.d ANN dans CLASS : Perf Fab

300pcm sur le k

- Erreur moyenne nulle

SDTEV(erreur)<3%

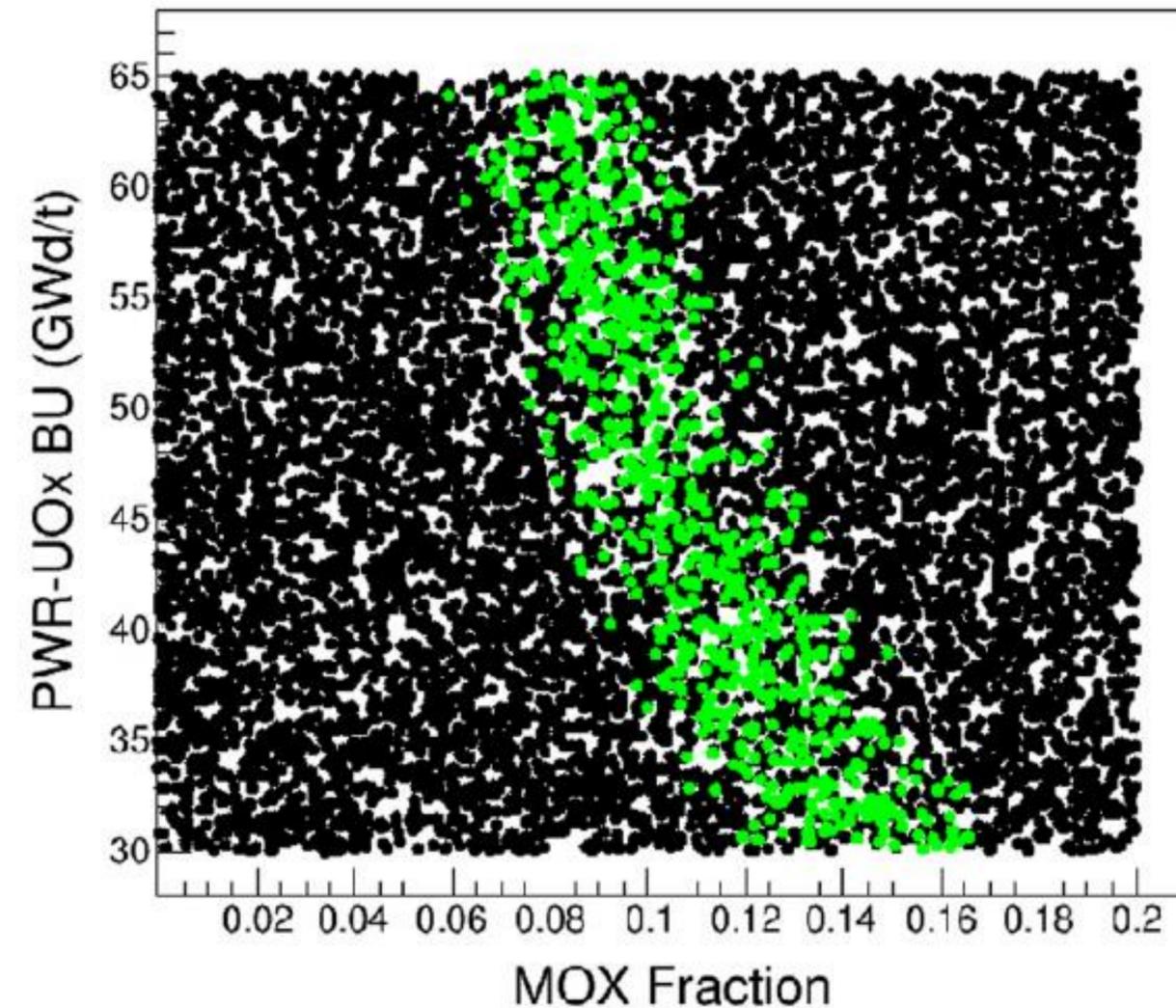
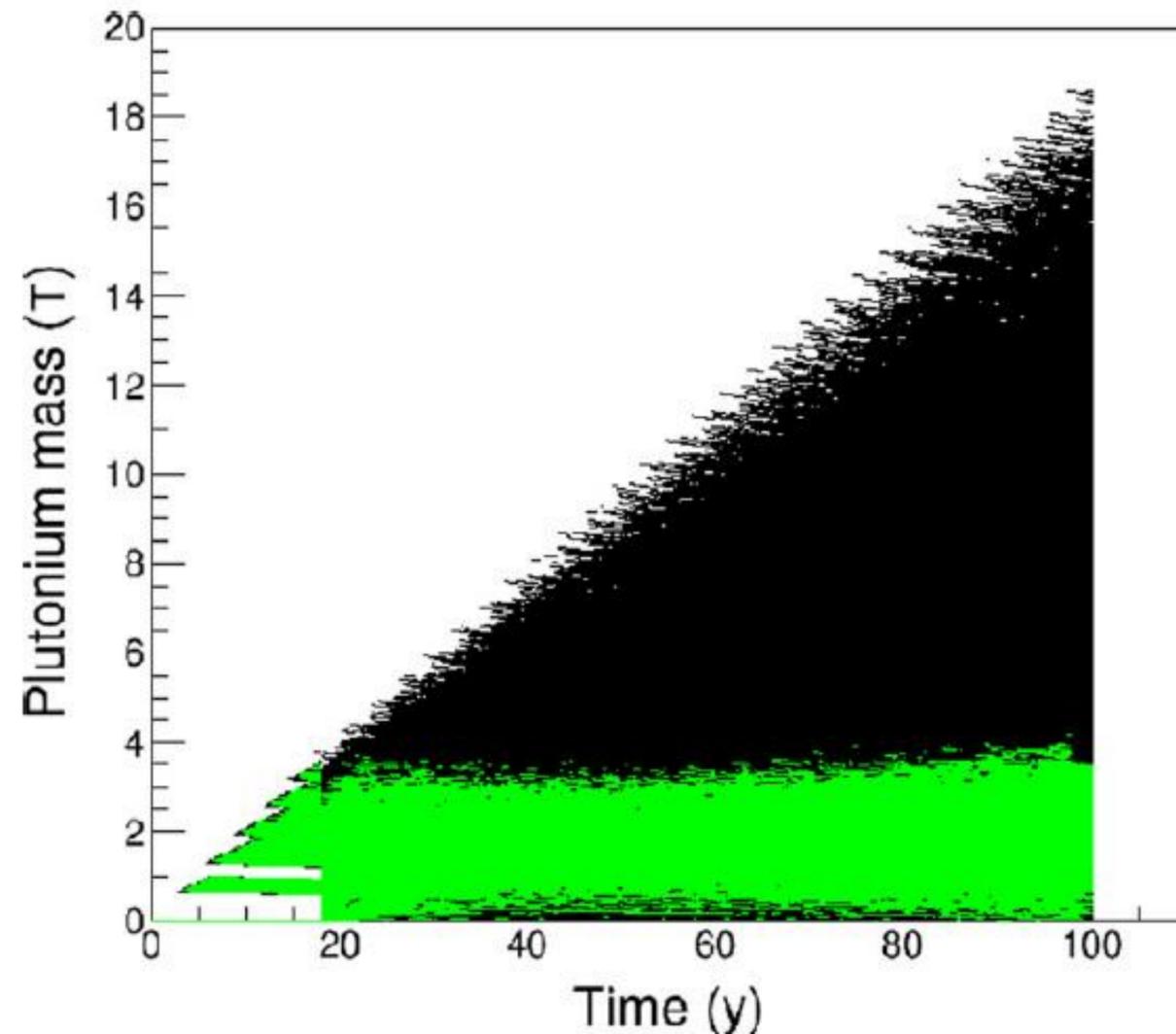


Courtesy of F. Courtin, 2017

# 7. Nouvelles méthodes postANN

ANN qui réduise le temps de calcul + CC IN2P3 : On peut simuler des 1000s trajectoires

Balayage exploratoire : « wide parameter sweep »

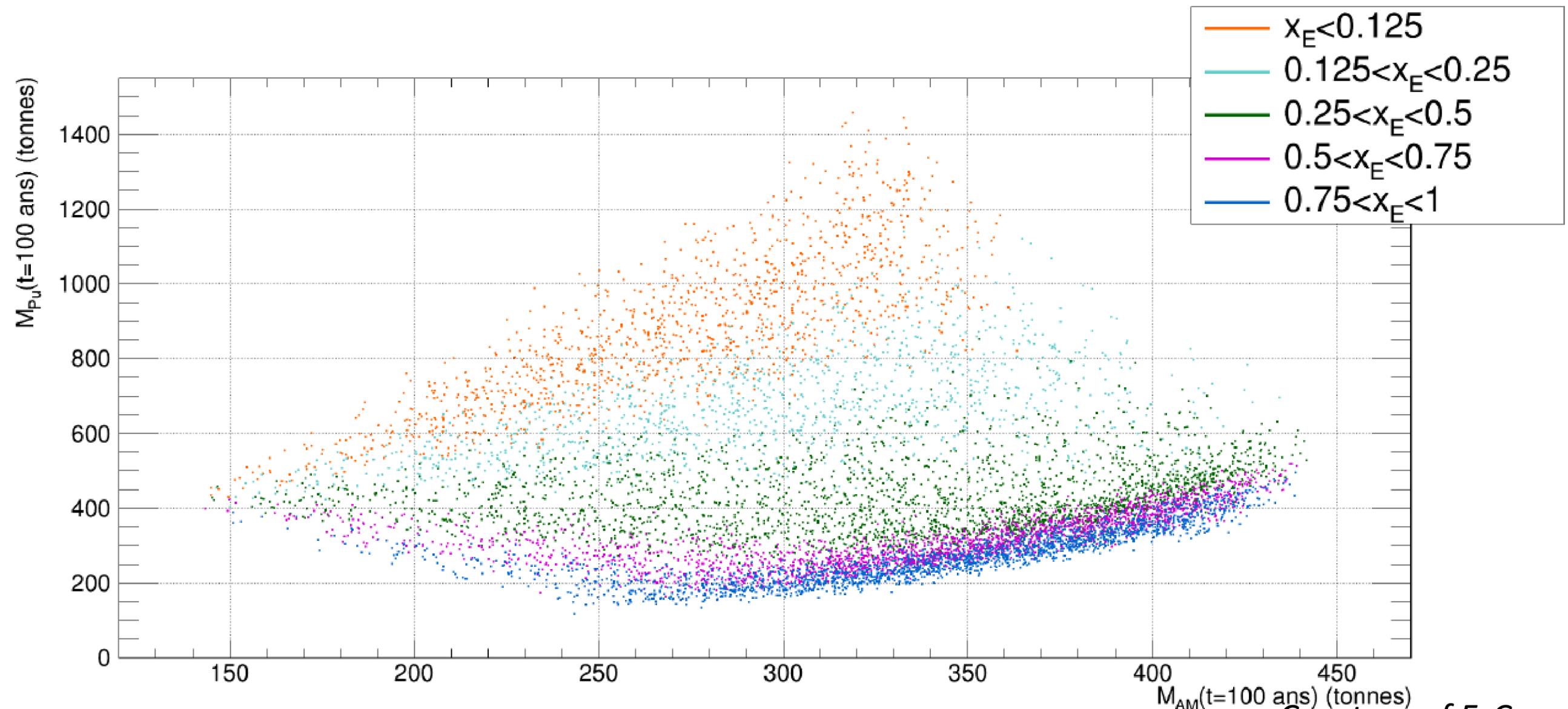


*Courtesy of N. Thiolliere, 2018*

# 7. Nouvelles méthodes postANN

ANN qui réduise le temps de calcul + CC IN2P3 : On peut simuler des 1000s trajectoires

Balayage exploratoire : « wide parameter sweep »



Courtesy of F. Courtin, 2017

# 7. Nouvelles méthodes postANN

ANN qui réduise le temps de calcul + CC IN2P3 : On peut simuler des 1000s trajectoires

Calculs d'indices de Sobol, pour evaluer sensibilité

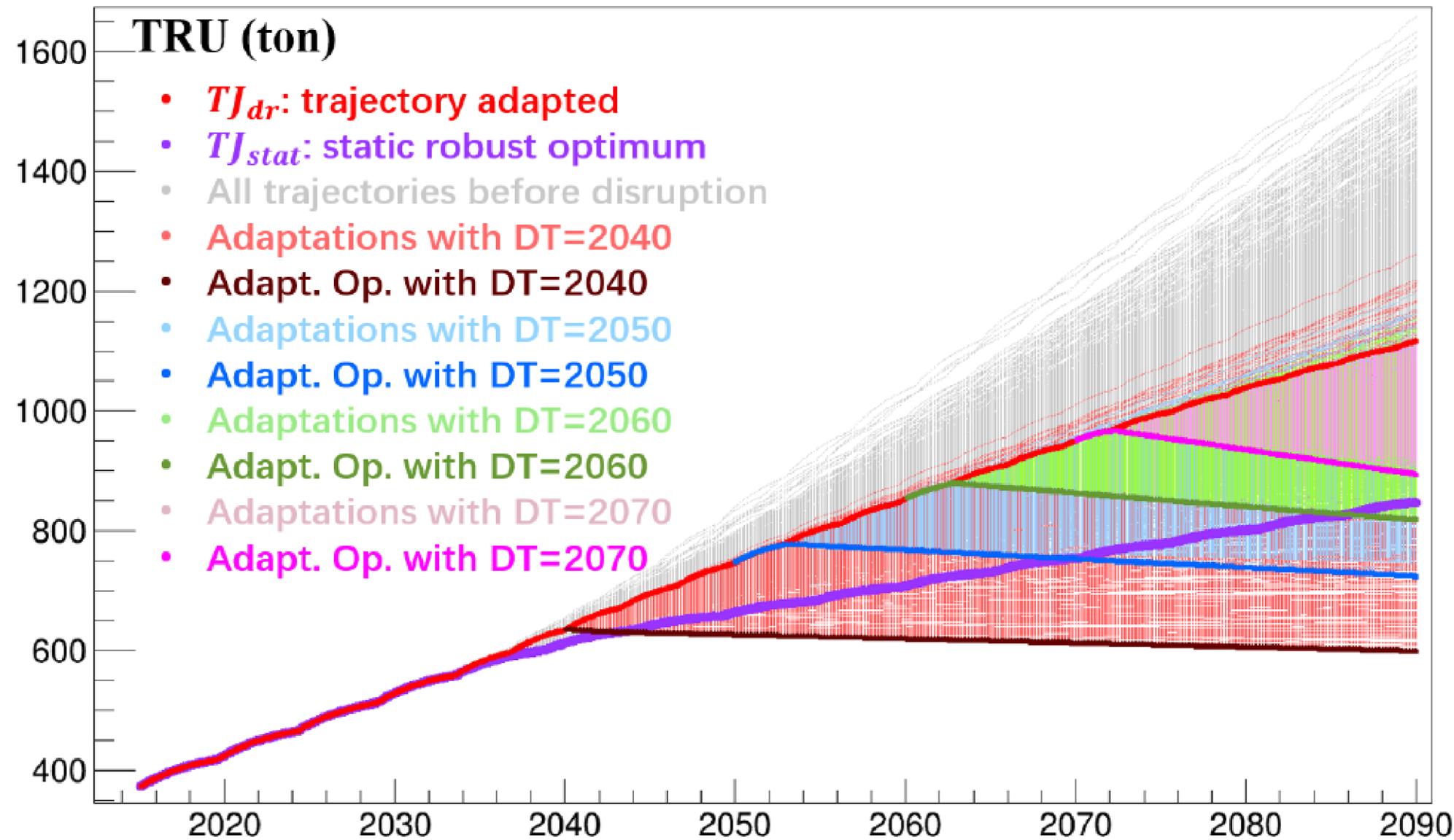
Element	Sobol' indices: 1st order/total			
	UOx BU	MOx BU	Fr. MOx	CT UOx
Pu All	0.40/0.42	-/-	0.57/0.60	-/-
MA LiFo	0.06/0.25	-/-	0.34/0.59	0.28/0.41
MA FiFo	0.20/0.36	-/-	0.57/0.76	-/-
Np All	0.68/0.68	-/-	0.32/0.31	-/-
Am LiFo	0.38/0.48	-/-	0.25/0.39	0.16/0.25
Am FiFo	0.52/0.60	-/-	0.34/0.45	-/-
Cm All	0.27/0.31	0.10/0.14	0.55/0.63	-/-
<sup>241</sup> Am LiFo	0.64/0.69	-/-	-/0.10	0.21/0.29
<sup>241</sup> Am FiFo	0.74/0.79	-/-	0.13/0.21	-/0.07
<sup>243</sup> Am All	0.29/0.32	-/-	0.62/0.68	-/-
<sup>244</sup> Cm All	0.28/0.33	0.07/0.12	0.56/0.65	-/-
<sup>245</sup> Cm All	0.23/0.25	0.18/0.22	0.50/0.59	-/-

*Courtesy of F. Courtin, 2017*

# 7. Nouvelles méthodes postANN

Etude de l'effet d'un changement de direction en cours de trajectoire

- double échantillonnage (parcours de l'espace des phase + adaptation)



Courtesy of J. Liang, 2019