

AGORA, un algorithme génétique pour la construction automatique de plans de cœur de réacteurs nucléaires

Jean-Yves Lucas¹, Julien Holleville², Andréa Laugère¹

¹EDF R&D Département OSIRIS, Palaiseau, France
{jean-yves.lucas, andrea.laugere}@edf.fr

²EDF R&D Département PERICLES, Palaiseau, France
julien.holleville@edf.fr

Mots-clés : *algorithme génétique, plans de cœur, réacteur nucléaire.*

1 Introduction

Chaque réacteur nucléaire du parc de production d'EDF doit être arrêté à intervalle régulier (environ une fois par an) afin de faire l'objet d'opérations de maintenance, et d'être partiellement rechargé en combustible. En effet, une recharge est constituée d'un grand nombre d'assemblages combustible (entre 157 et 251 selon le type de réacteur), et à l'occasion de ce renouvellement partiel du combustible, les assemblages combustible les plus irradiés doivent être remplacés par des assemblages combustible neufs, les autres assemblages combustible, eux, retournent en cœur pour une nouvelle campagne de production. Néanmoins, avant de recharger le cœur du réacteur, il convient de déterminer l'alvéole du cœur dans laquelle sera positionné chacun des assemblages de la recharge, l'ensemble des affectations d'un assemblage à une alvéole étant appelé un plan de cœur. On donne à la Figure (1) la représentation d'un cœur de réacteur REP 900 MW constitué de 157 alvéoles.

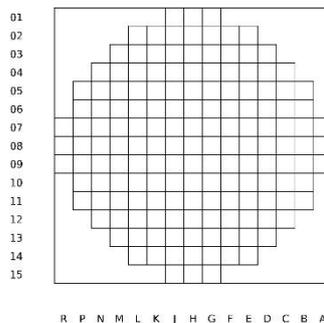


FIG.1 – cœur de réacteur REP 900 MW

La constitution d'un plan de cœur est soumise à deux types de contraintes :

- Contraintes neutroniques. Un certain nombre de critères neutroniques liés à la sûreté du cœur doit être satisfait ;
- Contraintes de positionnement. Ces contraintes interdisent le positionnement dans certaines alvéoles du cœur, ou selon certaines configurations géométriques, de certains assemblages, en fonction de leur type technologique, du nombre de campagnes de production qu'ils ont déjà effectuées, et de la nature de leur combustible (UNE - Uranium Naturel Enrichi, ou MOX – mélange d'oxydes d'Uranium et de Plutonium).

La détermination d'un plan de cœur satisfaisant toutes ces contraintes est un problème complexe. Elle est faite jusqu'à présent de manière manuelle par des ingénieurs spécialisés qui se basent sur leur expérience et les plans de cœur qu'ils ont déjà construits sur des recharges similaires. Le temps nécessaire pour trouver manuellement un plan de cœur satisfaisant, varie en moyenne d'une demi-journée à deux journées pour les cas les plus difficiles.

2 Difficultés du problème et choix de la méthode

L'objectif de ce travail était de choisir et d'implémenter une méthode d'optimisation susceptible de trouver automatiquement, et en un temps raisonnable, un plan de cœur vérifiant l'ensemble des contraintes mentionnées plus haut. Les caractéristiques du problème sont les suivantes :

- Il s'agit d'une optimisation « boîte noire » : pour évaluer chaque plan de cœur candidat, il est nécessaire de lancer le code de neutronique COCCINELLE. Le temps d'exécution varie d'environ 0,5 seconde à 5 secondes, selon le nombre de critères neutroniques calculés ;
- Il s'agit d'une optimisation multicritères, chaque critère neutronique doit être inférieur ou supérieur à un seuil fixé ;
- Le problème est essentiellement discret (positionnement d'assemblages dans des alvéoles). Il implique un espace de recherche gigantesque, évalué à environ 10^{32} configurations possibles.

Ces différentes caractéristiques nous ont amené à faire le choix d'un algorithme génétique (AG) pour résoudre ce problème. En effet, l'utilisation d'un code externe ne pose pas de difficulté dans un AG, et le fait d'avoir à chaque génération une population de configurations permet de prendre en compte de manière naturelle l'aspect multicritères, chaque individu de la population présentant des compromis différents du point de vue des différents critères. Enfin, la facilité de parallélisation de l'évaluation des individus d'une population était aussi un élément important (temps d'exécution réduits).

3 Résultats et perspectives

L'algorithme génétique a été implémenté dans un outil nommé AGORA (Algorithme Génétique pour Optimiser le Repositionnement des Assemblages), entre 2018 et aujourd'hui. Dans AGORA, la taille de la population de l'AG est de l'ordre d'une cinquantaine (entre 48 et 60 selon le type de réacteur), et le nombre de générations nécessaires pour trouver un plan de cœur varie de quelques dizaines à plusieurs centaines. Les temps d'exécution varient, eux, de 30 à 60 mn. Depuis 2020, AGORA est testé par les ingénieurs de l'UNIE d'Ingénierie d'Exploitation (UNIE) d'EDF. Il a d'emblée permis d'obtenir des résultats très intéressants dans des situations atypiques, pour lesquelles les ingénieurs de l'UNIE ne possédaient pas d'expérience, ces situations n'ayant jamais été rencontrées. C'est le cas notamment des derniers plans de cœur de la centrale de Fessenheim. L'hypothèse envisagée était de constituer des recharges avec 12 assemblages neufs de moins, auxquels devaient être substitués des assemblages ayant déjà séjourné en cœur, et conservés en réserve. Ce mode de rechargement n'avait encore jamais été utilisé. AGORA a pu fournir rapidement des plans de cœur satisfaisants, effectivement mis en œuvre avec très peu de retouches manuelles. Chaque assemblage neuf coûtant 12 millions d'euros, le gain pour les 2 réacteurs a été de 24 millions d'euros. D'autres situations atypiques ont aussi pu être traitées avec succès par AGORA. En 2023, une étude sera menée afin d'évaluer le gain annuel obtenu par l'utilisation d'AGORA, non plus seulement sur des situations inhabituelles, mais aussi sur les cas standards. L'objectif est que l'outil AGORA soit utilisé à terme sur chacun des plans de cœur établis par les ingénieurs de l'UNIE pour les 56 réacteurs nucléaires d'EDF.

Références

- [1] E. Israeli and E. Gilad. *Novel genetic algorithm for loading pattern optimization based on core physics heuristics*. Annals of Nuclear Energy, 118(2018) :35-48.
- [2] M.L. Jayalal, S.A.V. et al. *A survey of Genetic Algorithm Applications in Nuclear Fuel Management*. Journal of Nuclear Engineering and Technology. ISSN:2277-6184.Vol 4. Issue 1.
- [2] E.-G. Talbi. *Metaheuristics from design to implementation*. Wesley (2009).