

Une approche heuristique pour le choix de lots d'uranium de retraitement

Jean-Yves Lucas¹, Jean-Armand Moroni¹, Georgios Petrou²

¹ EDF R&D, Département OSIRIS, 7, avenue Gaspard Monge, 91120 Palaiseau, France
{jean-yves.lucas, jean-armand.moroni}@edf.fr

² EDF DPNT-DCN, 1, place Pleyel, 93200 Saint-Denis, France
georgios.petrou@edf.fr

Mots-clés : *Recherche opérationnelle, heuristique, retraitement du combustible nucléaire.*

1 Introduction

En France, le combustible nucléaire est retraité à l'usine Orano Cycle de La Hague, après son utilisation dans les réacteurs nucléaires d'EDF. En plus des déchets ultimes, qui représentent 4% de la masse d'uranium à retraiter, ce traitement permet aussi de séparer le plutonium (1% en masse), et de récupérer de l'Uranium de retraitement (ou URT) qui représente les 95% restant de la masse. Cet uranium de retraitement présente des caractéristiques très proches de celles de l'uranium naturel. Il constitue donc une matière première, pouvant être utilisée pour fabriquer de nouveaux éléments de combustible nucléaire, appelés assemblages combustibles. Ces assemblages combustibles pourront alors être utilisés pour recharger certains réacteurs nucléaires lors de futures campagnes de production d'électricité. La fabrication d'assemblages combustibles à partir d'uranium de retraitement requiert plusieurs étapes : la conversion (transformation de l'URT en hexafluorure d'uranium gazeux UF_6), l'enrichissement (centrifugeage de l' UF_6 afin d'obtenir la proportion souhaitée de l'isotope ^{235}U). A l'issue de ces deux étapes, on obtient de l'uranium réenrichi (URE). C'est cet URE qui est utilisé pour la dernière étape, la fabrication des assemblages combustibles eux-mêmes. La démonstration de cette utilisation de l'uranium réenrichi a été réalisée par EDF entre 1994 et 2013 dans la centrale nucléaire de Cruas. Depuis, la filière de production d'éléments de combustible nucléaire à partir d'uranium de retraitement a été relancée. Dans ce cadre, EDF cherche à optimiser le choix des lots d'URT utilisés pour ses besoins en fonction des contraintes de démonstration de sûreté en réacteur, de la qualité de cet URT (teneur en ^{235}U résiduelle), et des caractéristiques des procédés de conversion et d'enrichissement.

2 Le problème combinatoire

L'ensemble des assemblages combustibles qui vont être placés dans un cœur de réacteur nucléaire lors d'un arrêt pour rechargement s'appelle une recharge. La constitution de cette recharge est soumise à plusieurs contraintes : masse minimale et maximale d'URE, teneur maximale en certains isotopes de l'uranium, quantité minimale et maximale d'URT utilisé pour l'obtention de la masse nécessaire d'URE, nombre maximum de lots d'URT utilisés, etc. Ces contraintes peuvent varier d'une recharge à l'autre. Le problème revient alors à choisir, parmi des centaines de lots d'URT, les quelques lots présentant les bonnes caractéristiques pour constituer

chacune des recharges prévues. Le nombre de recharges à construire peut aller jusqu'à plus d'une centaine dans certains jeux de données.

Ce problème s'apparente en première approche à un problème de bin-packing, les conteneurs étant les recharges, les objets à placer étant les lots d'URT. Toutefois cette analogie n'est pas parfaite, car certaines différences compliquent la tâche :

- Contrairement aux conteneurs, les recharges sont étalées chronologiquement dans le temps, et chaque lot d'URT n'est disponible qu'à partir d'une certaine date : tous les lots ne peuvent pas être choisis pour remplir toutes les recharges ;
- Il ne s'agit pas de minimiser le nombre de conteneurs (le nombre de recharges est fixe et connu) mais chaque conteneur doit être entièrement rempli (la masse minimale de la recharge doit être atteinte). Pour cela il est possible de couper des lots (de ne prendre qu'une fraction de sa masse). Toutefois, le nombre maximum de coupes d'un lot est fixé, et une fois coupé, toutes ses parties devront être utilisées dans des recharges situées dans un laps de temps assez court ;
- Les étapes de conversion et d'enrichissement ne sont pas des processus linéaires : la masse d'URE résultante n'est pas la simple somme des masses d'URT utilisées en entrée de ces procédés.

Ce problème fait donc intervenir à la fois des variables continues et entières, et des fonctions non linéaires. Pour le traiter, un premier outil a été développé, faisant appel à une modélisation PLNE avec une approximation linéaire des étapes de conversion/enrichissement, et utilisant le solveur XPRESS. Toutefois, cette relaxation linéaire a imposé de prendre des marges, ce qui interdit la découverte de certaines meilleures solutions. Par ailleurs lorsque le problème implique des lots d'URT avec des isotopies atypiques, ou lorsqu'un grand nombre de contraintes sont actives, les temps d'exécution deviennent très longs, ou aucune solution n'est trouvée. C'est pourquoi nous avons développé un second outil, basé lui sur un algorithme heuristique de type énumération partielle itérée. A l'encontre du principe d'un algorithme glouton aléatoire, nous nous autorisons ici une énumération partielle des choix candidats dans l'ordre d'un critère heuristique, jusqu'à atteindre un nombre maximal d'essais, ou avoir trouvé un candidat qui respecte les contraintes testables à ce stade de la résolution. Dans ce dernier cas, on passe au choix suivant, sinon on annule tous les choix précédents et on recommence la construction d'une solution.

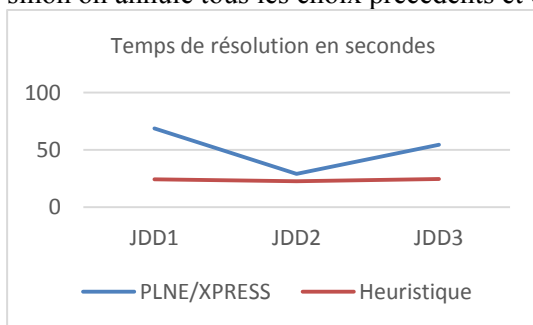


FIG. 1 - Résultats comparés sur 3 jeux de petite taille

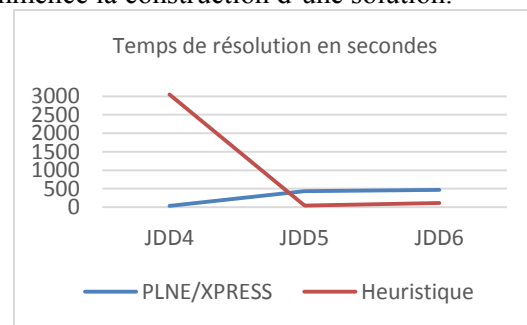


FIG. 2 - Résultats comparés sur 3 jeux de grande taille

Ce nouvel outil a des performances satisfaisantes, il fournit, sur l'ensemble des jeux de tests utilisés, des solutions en un temps qui varie de quelques secondes à quelques milliers de secondes, ce qui répond aux contraintes opérationnelles d'exploitation.

Références

- [1] El-Ghazali Talbi. *Metaheuristics from design to implementation*. Wesley. 2009.
- [2] Voß, Stefan, et al., eds. *Meta-heuristics: Advances and trends in local search paradigms for optimization*. Springer Science & Business Media, 2012.