

Recherche locale haute performance pour la gestion moyen-terme du parc nucléaire français

Frédéric Gardi¹, Karim Nouioua²

¹ Bouygues e-lab, Paris, France

fgardi@bouygues.com

² Laboratoire d'Informatique Fondamentale - CNRS UMR 6166,

Faculté des Sciences de Luminy - Université Aix-Marseille II, Marseille, France

karim.nouioua@lif.univ-mrs.fr

Mots-clés : *Gestion énergétique, planification de la maintenance, optimisation non-linéaire en variables mixtes, recherche locale randomisée, haute-performance algorithmique.*

1 Présentation du problème

La plupart de l'électricité française est produite par des centrales thermiques : 90 % en 2009 dont 82 % par des centrales nucléaires. Le sujet du Challenge ROADEF/EURO 2010 porte sur la gestion moyen-terme du parc thermique du Groupe EDF en France, et plus particulièrement des centrales nucléaires qui doivent être régulièrement arrêtées pour recharge et maintenance. La planification de ces arrêts doit respecter diverses contraintes, tout en assurant des programmes de production de coût minimum. Le lecteur intéressé est renvoyé à la spécification technique complète fournie par EDF dans le contexte du Challenge ROADEF/EURO 2010, disponible sur internet¹.

Le problème d'optimisation posé par EDF inclut deux sous-problèmes imbriqués selon un schéma maître/esclave. Le sous-problème maître consiste à déterminer un ordonnancement des arrêts des centrales nucléaires satisfaisant des contraintes induites par la limitation des ressources nécessaires aux opérations de maintenance. En bref, ce sous-problème induit des variables de décision combinatoires, sujettes à des contraintes relatives à des intervalles sur les entiers. Après avoir planifié les arrêts, le sous-problème esclave consiste à calculer un plan de production pour satisfaire la demande, c'est-à-dire à déterminer les recharges de stock pour chaque centrale et à chaque arrêt, ainsi que la quantité d'énergie à produire pour chaque centrale à chaque pas de temps pour chaque scénario. Ce sous-problème induit des variables de décision continues, sujettes à des contraintes classiques de conservation de flot et de capacité, mais également des contraintes non-linéaires activées sous certaines conditions logiques. Par ailleurs, l'horizon moyen-terme (5 ans) sur lequel le problème est posé implique de nombreuses incertitudes. Ces incertitudes sont modélisées à l'aide de multiples scénarios, spécifiant sur l'horizon les demandes et les coûts de production non nucléaires (charbon, pétrole, gaz). Ainsi, l'objectif est de minimiser le coût de production sur l'ensemble des scénarios.

Les instances à traiter sont de très grande taille : 8 arrêts à ordonnancer sur 300 semaines pour 70 centrales nucléaires, et des niveaux de production à déterminer pour 170 centrales thermiques (dont les 70 nucléaires) sur 10000 pas de temps pour 500 scénarios. De plus, le temps d'exécution de l'algorithme est limité à 1 heure sur un ordinateur standard. Les jeux d'essai sont divisés en trois catégories A, B, X contenant 5 instances chacun. Les instances A ont été communiquées au début de la phase de qualification du Challenge. Les équipes ont été sélectionnées pour la phase finale en fonction de leurs résultats sur ces instances. Ensuite, les instances B, plus grandes et plus réalistes, ont été données comme jeu de test pour la phase finale. Enfin, les finalistes ont été classés selon leurs

1. <http://challenge.roadef.org/2010/index>

résultats sur les instances B (connus des compétiteurs) et les instances X (inconnues des compétiteurs, communiquées après l'annonce des classement final). Les résultats finaux ont été annoncés à EURO 2010, 24^{ème} Conférence Européenne de Recherche Opérationnelle, à Lisbonne, Portugal.

2 Contribution

À notre connaissance, ce problème n'a encore jamais été abordé en l'état dans la littérature. Néanmoins, plusieurs logiciels et études ont été réalisés par EDF autour de ce problème, en particulier ces 10 dernières années. Le logiciel exploité actuellement à EDF est basé sur une décomposition du problème site par site, chaque sous-problème étant résolu de façon heuristique par programmation linéaire en nombres entiers en s'appuyant sur la décomposition maître/esclave. Malheureusement, celui-ci ne garantit pas la satisfaction de toutes les contraintes du problème. Plus de détails sur ces travaux, nous renvoyons le lecteur à la thèse de Doctorat de M.O.I. Khemmoudj.

Nous avons implémenté dans le cadre du Challenge une heuristique de recherche locale randomisée, technique rarement employée en optimisation mixte non-linéaire. La conception et l'implémentation de cette heuristique, et plus généralement le déroulement complet du projet, suivent une méthodologie formalisée par les auteurs et déjà appliquée avec succès à la résolution de plusieurs grands problèmes industriels. La première particularité de cette recherche locale est qu'elle est *directe* et *pure*. *Aucune décomposition* : l'espace de recherche exploré par notre algorithme est proche de l'espace des solutions du problème d'optimisation original. En particulier, les parties combinatoires et continues du problème sont traitées ensemble. *Aucune hybridation* : pas de métaheuristique particulière, pas de recherche arborescente. Même si cela peut être tentant, nous n'utilisons pas les techniques de programmation par contraintes pour explorer la partie combinatoire du problème (ordonner les arrêts), et nous n'utilisons pas non plus les techniques de programmation linéaire en nombres entiers pour résoudre la partie continue du problème (déterminer les recharges et les niveaux de production). La seconde particularité de notre recherche locale est qu'elle est *agressive* : *des millions de solutions admissibles sont visitées dans le temps imparti*. En effet, une recherche locale randomisée peut être vue comme une exploration incomplète, non déterministe d'un espace de recherche. De fait, plus on explore de solutions, plus on a de chance d'en trouver de bonne qualité.

Ainsi, notre heuristique de recherche locale est décomposée en trois niveaux : stratégie générale, mouvements, machinerie d'évaluation. Ce dernier niveau est le moteur de la recherche locale ; il évalue les impacts des mouvements sur les contraintes et les objectifs à chaque itération de la recherche. Le temps passé à implémenter chaque niveau durant le projet suit la distribution suivante : 10 %, 20 %, 70 %. Ainsi, contrairement à l'idée désormais répandue "recherche locale = métaheuristiques", notre travail s'est concentré sur : *concevoir des mouvements randomisés permettant une exploration diversifiée* de l'espace de recherche malgré de fortes contraintes, et *accélérer l'évaluation de ces mouvements* en implémentant notamment un *algorithme combinatoire incrémental et randomisé* pour résoudre de façon approchée mais efficace le sous-problème continu. Ce travail a été entouré d'un effort important pour assurer la fiabilité de l'algorithme (génie logiciel, programmation avec assertions, vérification systématique des structures incrémentales), critique dans la quête d'une recherche locale haute performance.

Notre algorithme a été classé 1er sur les jeux de données A et B (parmi 44 équipes engagées, 16 finalistes), avant d'être relégué à la 8^{ème} place du fait d'un bogue se manifestant sur certaines instances X, en dépit des efforts précédemment évoqués. Notons que, chose rare, seules 4 équipes parmi les 16 finalistes sont parvenues à fournir l'ensemble des solutions pour les 5 instances X. Une fois corrigé, notre algorithme produit les meilleures solutions sur ces instances dans des conditions similaires à celles du Challenge. Les résultats sur les instances B, tels qu'obtenus par les organisateurs², montrent un écart moyen de plus de 1 % (resp. 10 %) entre nos solutions et celles de l'équipe classée 3^{ème} (resp. 6^{ème}). *De tels écarts sont considérables puisqu'un écart de seulement 0.1 % entre deux solutions représente une économie annuelle de l'ordre du million d'euros.*

2. <http://challenge.roadef.org/2010/finalResults.pdf>