

Avant-propos

L'optimisation s'intéresse aux méthodes permettant de rendre optimales les conditions d'utilisation, de fonctionnement et de rendement d'un système, qu'il soit physique ou relevant de l'activité humaine. Au carrefour de nombreuses disciplines, qui sont les mathématiques appliquées, l'informatique et l'intelligence artificielle, elle permet de trouver rapidement une solution à de nombreux problèmes, qui seraient autrement plus difficiles à résoudre en se contentant d'une analyse mathématique restreinte.

S'appuyant sur des heuristiques, voire des métaheuristiques à un échelon plus élevé, les méthodes d'optimisation fournissent des solutions opérationnelles, qui ne sont pas forcément des solutions optimales, mais des solutions sous-optimales éligibles, dites « solutions acceptables », car possédant le niveau de performance requis pour atteindre un objectif sans faire opposition aux contraintes associées. À titre indicatif, on peut citer de nombreux problèmes dont la résolution s'appuie sur des méthodes d'optimisation :

- en finance, l'optimisation fiscale permet de minimiser l'imposition légale ;
- dans les bases de données, l'optimisation des requêtes permet d'améliorer l'accessibilité aux données partagées, en réduisant en particulier le temps des transactions ;
- dans les réseaux de télécommunications, l'optimisation du routage permet de trouver les chemins propices aux échanges de données ;
- en robotique, l'optimisation permet par exemple de trouver les meilleures configurations (des variables articulaires) par lesquelles le robot doit passer, afin d'exécuter efficacement une tâche ;

– en informatique, l’optimisation du code d’un programme permet de réduire l’espace mémoire occupé et d’accélérer les temps de convergence.

Les applications citées sont par nature très complexes, ce qui rend problématique la mise en œuvre de méthodes mathématiques exactes permettant de fournir des solutions admissibles sans mobiliser d’énormes ressources de calcul. Dans ces conditions, on est réduit à se contenter de solutions approchées, qui sont des solutions sous-optimales, mais néanmoins acceptables, car garantissant la réalisation d’un objectif tout en respectant les contraintes.

Dans le présent ouvrage, nous aborderons des problématiques relevant spécifiquement du domaine de la robotique médicale. Les applications traitées concernent la planification de trajectoire des bras manipulateurs redondants (**robots articulés**), dans le cadre de l’assistance au geste chirurgical, et la commande robuste pour la compensation des efforts ou l’assistance physique dans des situations de handicap (**exosquelette**). Ces applications sont exposées en détail, dans le souci de comprendre avec la plus grande clarté les problématiques à résoudre, ainsi que les choix opérés pour trouver des solutions efficaces dans des délais raisonnables.

Les méthodes développées font appel aux métaheuristiques d’optimisation, qui sont des algorithmes d’un haut niveau d’abstraction. Contrairement aux heuristiques, qui sont des procédés de calcul, souvent informels et « individuels » adaptés à des problèmes spécifiques, les métaheuristiques sont des algorithmes généraux applicables à une très large gamme de problèmes d’optimisation, sans recourir à une modification de fond de la structure de ces algorithmes. Les méthodes étudiées et les résultats produits sont commentés et présentés de façon exhaustive pour chacune des applications traitées. Bien que les méthodes proposées soient développées dans le contexte de leur application à la robotique médicale, leur caractère générique les rend facilement extensibles à d’autres problèmes d’optimisation, qui ne relèvent pas nécessairement du même domaine d’application.

Introduction

Ce volume fait partie d'une série d'ouvrages, parus chez ISTE Editions, consacrés aux métaheuristiques et à leurs applications. Connues comme étant des algorithmes spécifiques et particuliers, quel intérêt pratique les métaheuristiques ont-elles pour susciter un attrait croissant auprès des ingénieurs, chercheurs et scientifiques de domaines divers s'intéressant à des champs d'application variés ? Deux arguments de taille nous donnent à l'évidence des éléments de réponse : d'une part, le champ d'application des métaheuristiques gagne sans cesse du terrain, sans connaître – semble-t-il – de limites ; d'autre part, ces méthodes de résolution ont un haut niveau d'abstraction, qui permet de les adapter à une large gamme de problèmes de l'ingénierie. En effet, quelques adaptations nécessaires ne modifiant pas le fond des algorithmes suffisent en général pour résoudre de nouveaux problèmes d'optimisation sans qu'existent des liens particuliers entre eux.

Pour autant, les métaheuristiques appartiennent à une classe d'algorithmes particuliers, pas toujours faciles à paramétrer et réservés aux problèmes d'optimisation difficiles, pour lesquels on ne connaît pas de méthode exacte permettant de les résoudre de manière plus efficace. Parmi ces problèmes réputés complexes, on peut citer les problèmes dont les modèles mathématiques ne sont pas dérivables, les problèmes dont l'espace de recherche est trop vaste pour énumérer de manière exhaustive toutes les solutions réalisables, tels que les problèmes de nature combinatoire ou à variables de décision continues, ainsi que tous les problèmes aux données fortement bruitées, erronées, voire incomplètes, qui se prêtent mal à une modélisation mathématique. Pour toute cette catégorie de problèmes, on se contente en général de solutions approchées appartenant

au domaine des solutions admissibles, qui permettent d'atteindre un objectif sans violer les contraintes que l'on peut s'imposer *a priori*.

En pratique, il peut exister plusieurs solutions à un problème d'optimisation, dont une seule est en général optimale. Toutes les autres sont des solutions sous-optimales, qui sont néanmoins des solutions éligibles, dites « acceptables », car garantissant la réalisation d'un objectif sans transgresser les contraintes qui peuvent être associées. Soulignons toutefois que la notion d'acceptabilité en optimisation peut revêtir un caractère abstrait : où placer le curseur de l'opérabilité d'une solution lorsque le niveau d'appréciation de ladite solution peut varier non seulement d'un utilisateur à l'autre, mais aussi avec la marge d'erreur tolérée par chaque type d'application ? À l'évidence, il n'y a pas de réponse absolue à cette question, car il appartient à chacun de savoir définir le niveau d'acceptabilité d'une solution, compte tenu de ses besoins et de la qualité des résultats recherchés pour l'application traitée.

Les métaheuristiques sont-elles des [algorithmes déterministes](#) ou [stochastiques](#) ? Apporter une réponse tranchée à cette question n'est pas non plus aisé. En effet, s'il est clair que les métaheuristiques ne sont pas des algorithmes déterministes, elles ne sont pas non plus des algorithmes tout à fait stochastiques. En fait, elles sont à mi-chemin de ces deux familles d'algorithmes, car la résolution d'un problème d'optimisation au moyen d'une métaheuristique s'appuie systématiquement sur un échantillonnage plus ou moins aléatoire de l'espace des solutions. Au démarrage de l'algorithme, on fait place en général à une très grande part de hasard dans la recherche des solutions. Ensuite, au fil des itérations, on ferme le jeu pour réduire progressivement cette part de hasard à mesure que l'on s'approche de la phase finale de l'algorithme. Ainsi, une métaheuristique se comportera comme un algorithme stochastique aux premières itérations et tendra asymptotiquement vers un [algorithme glouton](#) et déterministe aux dernières itérations. Comme on peut s'en douter, la précision d'une métaheuristique réside dans le juste équilibre à trouver entre les phases d'exploration, où intervient une grande part de hasard dans la recherche des solutions, et les phases d'intensification, ou d'exploitation des solutions, où se réduit cette part de hasard, afin de ne privilégier que des solutions potentiellement prometteuses. Il n'existe pas aujourd'hui de méthode de paramétrage automatique de ces deux phases de recherche, dont les poids respectifs relèvent en général du type d'application étudiée, de l'effort de calcul à supporter et des résultats recherchés.

Aujourd'hui, les métaheuristiques sont devenues quasi incontournables dans de nombreux domaines de l'ingénierie, en raison des difficultés à surmonter pour résoudre correctement les problèmes d'optimisation rencontrés. Ces difficultés résident en général dans la nature complexe des systèmes étudiés : le nombre de contraintes et de variables de décision à prendre en compte peut être très élevé, les temps de calcul très longs et les fonctions objectifs susceptibles d'être non dérivables, fortement multimodales, voire trop complexes pour les formaliser avec précision mathématiquement. Le domaine de la robotique est par nature un champ d'application très vaste. En effet, on trouve ces algorithmes très pertinents dans de nombreuses applications de la robotique :

- la planification de trajectoire pour les robots mobiles ;
- la commande robuste de robots portables d'assistance aux mouvements ;
- les tâches de coopération entre robots ;
- la vision en robotique.

Dans cet ouvrage, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'utilisation des métaheuristiques pour résoudre des problèmes de planification de trajectoire pour des bras manipulateurs redondants, ainsi que des problèmes de contrôle-commande de robots collaboratifs d'assistance. Ces études sont menées dans la perspective d'exploiter à terme les résultats en milieu clinique, dans le cadre de l'assistance au geste chirurgical ou de l'assistance physique pour une compensation des efforts ou une augmentation des capacités motrices dans l'exécution d'une tâche.

Concernant la planification de trajectoire, les difficultés rencontrées sont liées à la nature redondante du robot utilisé (bras manipulateur à plusieurs degrés de liberté), à la nature du milieu dans lequel évolue le robot (environnement encombré d'obstacles, incertitudes sur l'environnement, etc.) et, bien entendu, à la complexité de la tâche à accomplir (le niveau de précision recherché, la durée tolérée pour réaliser cette tâche, le dosage de la puissance motrice afin de minimiser l'énergie consommée et éviter les mouvements brusques, qui pourraient détériorer la structure mécanique du robot). Tous ces paramètres peuvent induire un nombre excessivement élevé de variables de décision et de contraintes à prendre en compte.

Dans le cas de la commande de robots collaboratifs (robots à retour d'effort conçus pour l'assistance physique dans la réalisation d'une tâche), la complexité

du problème tient au nombre quasi infini de solutions combinatoires à tester avant de trouver les bonnes valeurs des paramètres de commande qui fourniraient l'effort optimal désiré, dans des délais raisonnables, sans mouvements anachroniques susceptibles de mettre en danger la personne assistée ou de présenter un risque de résonance qui pourrait détériorer la structure mécanique du robot. Le système automatique de commande étant conçu pour fonctionner en environnement incertain et dynamique, la tâche se complique du fait de l'asservissement qui se déroule en temps réel, afin de tenir compte des perturbations externes et de l'évolution permanente des données d'entrée (consignes) au fil du temps.

Nous soulignons que les problématiques d'optimisation étudiées dans cet ouvrage ont fait l'objet de travaux de recherche menés en collaboration entre des laboratoires universitaires et des établissements hospitaliers. Malgré l'aspect pratique et expérimental de ces travaux, les méthodes développées sont globalement génériques et peuvent être généralisées à d'autres domaines d'application sans nécessiter de modifications importantes dans la structure des algorithmes. Par cet aspect, ces méthodes peuvent intéresser un très large public : des étudiants en robotique, en algorithmique, en mathématiques appliquées et en recherche opérationnelle, ainsi que des ingénieurs ou des enseignants-chercheurs confrontés à des problèmes d'optimisation difficiles.

Cet ouvrage est organisé en cinq chapitres.

Le chapitre 1 est une étude générale qui rappelle les fondements mathématiques nécessaires à la modélisation des problèmes d'optimisation, afin de les résoudre à l'aide de méthodes numériques. Les méthodes de base sont répertoriées, commentées et classées selon leurs caractéristiques et propriétés. Ce chapitre est essentiel pour comprendre les approches développées dans les chapitres suivants pour résoudre des problématiques médicales relativement complexes.

Le chapitre 2 traite de l'application des métaheuristiques à des problèmes d'optimisation se rapportant à la robotique. Un accent particulier est mis sur des problématiques relevant des champs de la planification de trajectoire et du contrôle-commande. Les défis rencontrés, les difficultés à surmonter et l'intérêt des métaheuristiques pour les résoudre de manière approchée, mais suffisamment efficace, sont exposés avec le plus grand souci de clarté. Les

algorithmes généraux les plus répandus dans ces deux domaines d'application sont également présentés de manière détaillée.

Le chapitre 3 est consacré au problème spécifique de la planification de trajectoire des bras manipulateurs redondants. Une méthode de résolution s'appuyant sur un **algorithme bigénéétique** (deux algorithmes génétiques s'exécutant en tandem) est exposée dans ce chapitre. Inspirée des problèmes d'optimisation à deux niveaux, cette méthode distingue deux espaces de planification : l'espace cartésien pour contrôler et guider les déplacements de l'effecteur (organe terminal du bras manipulateur) dans l'environnement de travail et l'espace articulaire pour actionner les différents segments du bras motorisé. La coordination des mouvements du robot dans ces deux espaces est assurée par la collaboration des deux algorithmes génétiques. Chacun de ces deux algorithmes utilise ses propres variables de décision et optimise sa propre fonction **objectif** en explorant son espace restreint de planification (espace cartésien ou espace articulaire exclusivement). Cependant, les prises de décision par les deux algorithmes se font en interaction en échangeant en permanence leurs données. De cette manière, les résultats de l'un sont exploités aussi par l'autre, afin de conforter ou corriger ses propres décisions.

Le chapitre 4 s'intéresse à un aspect particulier de la planification de trajectoire, à savoir l'obtention de courbes lisses (courbes primitives et dérivées). Partant des résultats produits par la méthode du chapitre 3, l'objectif est de compléter ces derniers de manière à optimiser simultanément la trajectoire et le comportement dynamique du robot. À cette fin, la planification de trajectoire est reformulée sous la forme d'un problème d'optimisation avec contraintes, dont la résolution fait appel à une métaheuristique combinant un algorithme génétique avec la méthode du **lagrangien augmenté**.

Le chapitre 5 aborde les problèmes de la commande par retour d'état des robots collaboratifs. On s'intéressera plus particulièrement à l'exosquelette, conçu pour une augmentation des capacités motrices dans l'exécution d'une tâche ou une compensation des efforts en situation de handicap. Le système de commande automatisé met en œuvre un correcteur **PID**. L'objectif est de trouver la combinaison optimale des trois actions du correcteur, fournissant en temps réel l'effort le mieux adapté aux besoins de la personne assistée :

– **action proportionnelle** : l'erreur de commande est multipliée par un gain K_p ;

- **action intégrale** : l'erreur est multipliée par un gain K_i ;
- **action dérivée** : l'erreur est multipliée par un gain K_d .

Le problème à résoudre étant par nature combinatoire et à variables continues, la difficulté réside dans le nombre quasi infini de solutions à tester pour trouver la combinaison des paramètres K_p , K_i et K_d qui produiraient le couple de commande approprié. Une seconde difficulté réside dans le déroulement en temps réel de la commande du PID, afin de tenir compte des perturbations extérieures et de l'évolution permanente des efforts demandés au robot. Pour surmonter toutes ces difficultés, une métaheuristique à base d'un algorithme exploitant l'intelligence par essaim est développée. Cette métaheuristique est une adaptation de l'algorithme d'**optimisation par essaim de particules** (OEP) pour les besoins de l'application.

Enfin, une conclusion générale, donnée à la fin du livre, récapitule brièvement les problématiques étudiées et rappelle les méthodes préconisées pour les résoudre de manière appropriée. Des perspectives de développement et des pistes à explorer sont également indiquées, afin de parvenir, à terme, à exploiter les résultats dans le cadre clinique. Pour conclure cette introduction, nous rappelons que chacun des chapitres de cet ouvrage est suivi d'une liste des références bibliographiques que le lecteur pourra consulter, de façon à approfondir, si besoin est, des notions théoriques ou pratiques non développées suffisamment dans ce livre.