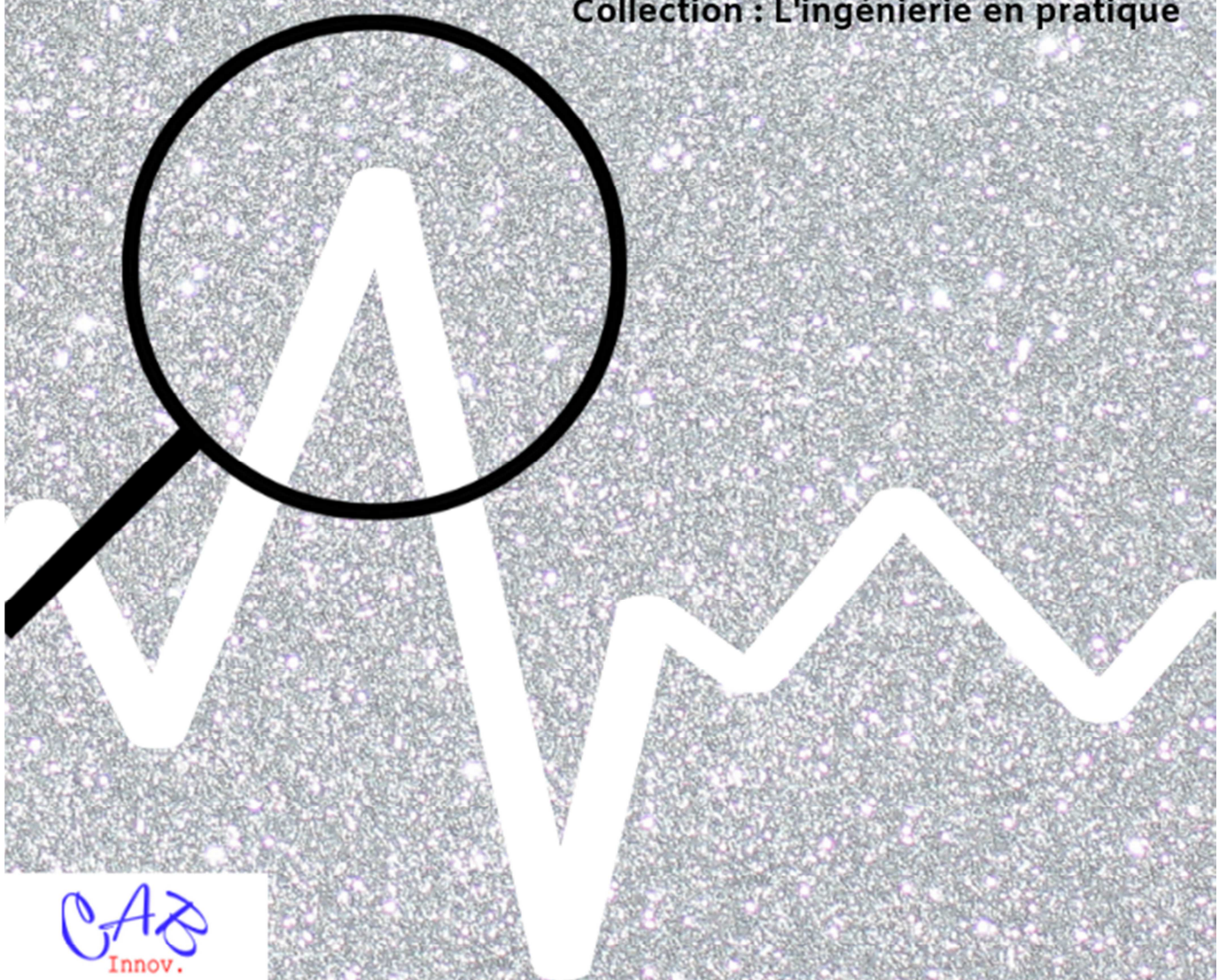


ADRIEN & AURELIEN CABARBAYE

L'OPTIMISATION MULTIDISCIPLINAIRE, L'AUTRE ENJEU DU BIG DATA

Collection : L'ingénierie en pratique



CAB
Innov.

CAB INNOVATION éditeur

Collections

L'ingénierie en pratique

(Prochainement disponible en anglais)

- L'optimisation multidisciplinaire, l'autre enjeu du Big Data

Du même éditeur :

La fiabilité en pratique

(Disponible en français et en anglais)

- Maîtrise des risques & fiabilisation des systèmes
- L'estimation en Sûreté de Fonctionnement
- Modélisation, évaluation et optimisation en Sûreté de Fonctionnement
- De la quantification du risque à l'optimisation des systèmes (regroupe le contenu des deux précédents ouvrages)
- Sûreté de Fonctionnement & optimisation des systèmes (regroupe le contenu des trois premiers ouvrages)

A paraître

- Mise en œuvre des essais accélérés

Edition CAB INNOVATION, 979-10-97287, 2019

« Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite (loi du 11 mars 1957 alinéa 1er de l'article 40). Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction par un art ou un procédé quelconque. »

Préface

L'optimisation reste dans notre pays l'apanage de quelques mathématiciens de haut vol très peu au fait des problématiques industrielles, alors qu'elle devrait constituer un outil de base de tout expert métier. Mais notre monde académique semble rechigner à diffuser largement les bases de techniques relativement simples d'usage et d'une redoutable efficacité.

Ainsi, les méthodes évolutionnaires inventées à la fin du siècle dernier (algorithmes génétiques, recuit simulé, etc.) sont très bien adaptées aux problématiques industrielles de type boîte noire pour trouver la configuration de nombreux paramètres donnant la meilleure solution au problème rencontré (sans garantir cependant que celle-ci ait bien été identifiée). Leur (trop) lente convergence peut être considérablement accélérée par l'hybridation de méthodes globales et locales comme le met notamment en œuvre l'outil Gencab¹, développé par moi-même il y a une vingtaine d'années, pour exploiter des données de retour d'expérience, dimensionner des conditions d'essais ou concevoir au mieux des architectures de systèmes et leurs conditions d'exploitation et de maintenance.

Aussi, je remercie Adrien et Aurélien Cabarbaye, pour cet ouvrage qui vulgarise des notions que tout ingénieur devrait connaître, présente des travaux que j'ai pu initier, expose des problématiques concrètes émanant notamment du domaine aéronautique et propose des pistes prometteuses d'amélioration méthodologique. Il s'adresse à la fois au débutant qui y trouvera une présentation didactique des bases de l'optimisation, mais aussi à l'analyste confirmé qui pourra y puiser des solutions pratiques pour parfaire ses propres travaux.

Ce livre s'adresse enfin aux décideurs au sein des entreprises et organisations qui doivent être alertés sur l'innovation de rupture qui les menace. Pouvant améliorer les performances des produits (biens ou services) de dizaines de pourcents, et non plus à la marge, l'optimisation multidisciplinaire offre un sérieux avantage compétitif à ses utilisateurs. Elle engendre, par là-même, un risque

¹Cabarbaye A., *Outil générique d'optimisation dans le domaine discret et/ou continu éventuellement stochastique*, Roadef 2003.

d'obsolescence aux organisations à la traîne, probablement bien supérieur à celui engendré par la transition numérique.

Je souhaite au lecteur de cet ouvrage clair et concis, autant de plaisir que j'en ai eu moi-même à le lire et que j'en aurai probablement à le consulter régulièrement.

André Cabarbaye
Editeur et expert en Sûreté de Fonctionnement

Table des matières

Collections	3
Préface	7
Table des matières	9
Avant-propos	13
1. Introduction	17
2. L'optimisation	19
2.1. Les concepts de base	20
2.1.1. Optimisation paramétrique	20
2.1.2. Formulation d'un problème d'optimisation	21
2.1.3. Un exemple d'application	21
2.1.4. Traitement des contraintes	22
2.1.4.1. Méthode de pénalité	23
2.1.4.2. Méthode du point intérieur	23
2.1.4.3. Méthode des multiplicateurs de Lagrange	24
2.1.5. Optimisation multi-objectif	25
2.2. Les méthodes d'optimisation	26
2.2.1. Généralités	26
2.2.2. Méthodes combinatoires	29
2.2.2.1. Programmation dynamique et algorithmes gloutons	31
2.2.2.2. Relaxation de contraintes	31
2.2.2.3. Méthodes de séparation et évaluation (<i>branch and bound</i>)	31
2.2.2.4. Optimisation linéaire en nombres entiers (OLNE)	32
2.2.2.5. Programmation par contraintes	32
2.2.3. Méthodes locales	33
2.2.3.1. Méthode de Newton	33
2.2.3.2. Méthode du gradient	34
2.2.3.3. Simplexe non-linéaire ou algorithme de Nelder-Mead	35
2.2.4. Méthodes globales	36
2.2.4.1. Heuristiques et métaheuristiques	36
2.2.2.4.1 Le recuit simulé	37
2.2.2.4.2 Les algorithmes évolutionnistes	38
2.2.2.4.3 Les algorithmes de colonies de fourmis	38
2.2.2.4.4 L'optimisation par essais particuliers	39
2.2.4.2. Les algorithmes génétiques	40

2.2.4.2.1	Principe général.....	40
2.2.4.2.2	Initialisation de la population	43
2.2.4.2.3	Mutation.....	43
2.2.4.2.4	Evolution Différentielle	44
2.2.4.2.5	Croisement	45
2.2.4.2.6	Hybridation avec la méthode du simplexe.....	45
2.2.4.2.7	Partage (sharing)	46
2.2.4.2.8	Migration.....	46
2.2.4.2.9	Mise à l'échelle (scaling).....	46
2.2.4.2.10	Sélection.....	47
2.2.4.2.11	Parallélisation des traitements.....	49
2.2.5.	Méthodes d'optimisation hybrides	50
2.2.6.	Choix entre les diverses méthodes.....	50
2.3.	Applications caractéristiques.....	53
2.3.1.	Ajustement d'une courbe.....	53
2.3.2.	Ajustement d'un modèle probabiliste.....	54
2.3.2.1.	Maximum de vraisemblance.....	54
2.3.2.2.	Précision des résultats	56
2.3.3.	Plans d'expériences	58
2.3.3.1.	Exploitation des résultats d'essais.....	59
2.3.3.1.1	Modèle linéaire	59
2.3.3.1.2	Modèle non linéaire.....	60
2.3.3.2.	Planification optimale des plans d'expériences.....	61
2.3.3.2.1	D-Optimalité.....	61
2.3.3.2.2	Méthode Caboum	62
2.3.3.2.3	Distribution homogène des conditions d'essais	65
2.3.4.	Optimisation robuste et dimensionnement probabiliste.....	65
2.3.4.1.	Dimensionnement probabiliste et pire cas.....	66
2.3.4.2.	Simulation de Monte-Carlo.....	67
2.3.4.2.1	Principe.....	67
2.3.4.2.2	Précision des résultats.....	68
2.3.4.3.	Couplage efficace entre optimisation et simulation.....	71
2.3.4.3.1	Optimisation par rapport à une valeur moyenne	72
2.3.4.3.2	Optimisation par rapport à la valeur d'un quantile	76
3.	L'optimisation multidisciplinaire.....	78
3.1.	Méthodes mono et multiniveaux.....	79
3.1.1.	Méthode MDF (<i>Multidisciplinary Feasible Design</i>)	79
3.1.2.	Méthode IDF (<i>Individual discipline Feasible</i>).....	80
3.1.3.	Méthode CO (<i>Collaborative optimization</i>)	80

3.2. Optimisation locale par la méthode du gradient (méthode adjointe)....	82
3.3. Optimisation dans le domaine aéronautique	84
3.3.1. Optimisation d'une aile d'avion (méthode adjointe)	85
3.3.2. Optimisation par une méthode d'optimisation hybride	88
3.3.2.1. Dimensionnement d'un drone de type avion	88
3.3.2.2. Dimensionnement d'un drone de type hélicoptère	92
3.3.2.3. Propulsion hybride	95
3.3.2.4. Dimensionnement d'un drone de type convertible.....	99
3.3.2.5. Trajectoire d'urgence	102
3.3.2.6. Modèle aérodynamique généré par plan d'expériences	103
3.3.2.7. Segmentation du marché aéronautique.....	104
4. Pour une plateforme générique d'optimisation multidisciplinaire .	106
4.1. Constat sur la conception optimale.....	106
4.2. Attentes vis-à-vis des méthodes et outils de MDO	107
4.3. Bref tour d'horizon des solutions existantes	111
4.4. Le projet Gencab Indra	113
4.4.1. Format des variables de décision	113
4.4.2. Ordre des variables de décision	114
4.4.3. Adaptation des opérateurs aux types de variables.....	115
4.4.4. Parallélisation des traitements.....	116
4.4.5. Imbrication des algorithmes.....	117
4.4.6. Structure générique d'entrée/sortie des algorithmes	120
4.4.7. Architecture globale	121
5. Conclusion	125
<i>Bibliographie</i>	<i>127</i>
<i>INDEX</i>	<i>131</i>
<i>Table des illustrations</i>	<i>135</i>

Avant-propos

Le Big Data désigne l'analyse de données massives qui dépasse les capacités humaines ainsi que celles des outils informatiques classiques de gestion de l'information. Au-delà de son nom un peu fourre-tout, ce nouveau domaine de l'informatique (mais pas uniquement) est extrêmement vaste et va du développement d'outils ou de cadres² de calculs extrêmement distribués et concurrents, au stockage, à l'analyse statistique et au traitement des volumineux jeux de données collectés³. Aussi, de nombreux domaines de l'ingénierie s'y rapportent-ils comme l'ingénierie logicielle, le traitement du signal ou les mathématiques appliquées.

Le Big Data recouvre également l'Intelligence artificielle, récemment renforcée par des réseaux de neurones multicouches qui traitent des phénomènes non-linéaires et ont une capacité d'apprentissage profond. Cette aptitude à apprendre devient même autonome en simulant les situations possibles comme dans le cas d'un logiciel de jeu de Go (AlphaGo Zero de Google).

Mais les systèmes respectent rarement des règles préétablies et la connaissance acquise de leurs comportements dans un environnement incertain n'est souvent que partielle en raison de l'effet combinatoire. Aussi, l'intelligence artificielle est-elle loin d'être infaillible comme le rappellent périodiquement les accidents de voitures autonomes. Elle mémorise et classe un nombre très élevé de schémas décisionnels mais sans aucune faculté de compréhension ou de priorisation des phénomènes observés ou détectés. Elle est également incapable d'élaborer et de traiter le moindre concept à partir de quelques exemples que ce soit et est

² Un cadre (framework) désigne un ensemble cohérent de composants logiciels servant à créer les fondations ainsi que les grandes lignes de tout ou partie d'un logiciel.

³ Mayer-Schönberger V., Cukier K., *Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work and Think*, John Murray, ISBN 9781848547926, 2013.

facilement sujette aux différents biais présents dans les données d'apprentissage⁴.

Le Big Data bénéficie cependant d'un véritable engouement. Il modifie profondément certaines activités par sa capacité à identifier des similarités dans d'importants jeux de données, telles que le profilage publicitaire, le diagnostic médical ou celui concernant l'état de dégradation des produits en opération, qui aide à la maintenance préventive et à la gestion des actifs (*Health Monitoring & Asset management*).

Mais il peut engendrer des innovations de rupture encore plus importantes dans tous les domaines d'activité à travers l'optimisation multidisciplinaire (*MDO : Multidisciplinary Design Optimisation*).

Capable de trouver un optimum de conception entre les divers métiers⁵, sans plus chercher de mauvais compromis entre les spécialistes, la MDO est, en effet, susceptible d'améliorer très significativement les performances et caractéristiques des produits (biens ou services) en sachant explorer l'espace infini des solutions possibles.

Bien que les fondements de cette nouvelle méthode de conception aient été établis dès les années 1970⁶, son application réelle, et donc son adoption dans le développement de systèmes, n'est devenue possible que récemment grâce à l'introduction et à la mise à disposition par le Big Data de nouvelles technologies et ressources, autrefois indisponibles ou difficiles d'accès, qui permettent de réduire significativement les temps de calculs.

⁴ cf. <https://www.bbc.co.uk/news/technology-45561955>,

et <https://www.forbes.com/sites/paulteich/2018/09/24/artificial-intelligence-can-reinforce-bias-cloud-giants-announce-tools-for-ai-fairness/#384038d9d21f>.

⁵ Papalambros, Panos Y., Wilde, Douglass J. *Principles of Optimal Design: Modeling and Computation*, Cambridge University Press, ISBN 9781316867457, 2017.

⁶ Avriel M., Rijckaert M.J., Wilde D.J., *Optimization and Design*, Prentice-Hall, 1973.

L'entrée de la MDO dans le panel d'outils des concepteurs est donc récente, et comme pour la CAO (conception assistée par ordinateur) en son temps, c'est dans le domaine aéronautique, où son intérêt apparaît flagrant, que les premières techniques de recherche de conceptions optimales interdisciplinaires ont été mises en place.

En effet, même si Marcel Dassault a toujours considéré qu'un bel avion est un avion qui vole bien, la conception aéronautique n'est pas un travail d'artiste mais résulte d'une optimisation plus ou moins réussie du comportement d'un corps dans un fluide. La MDO est déjà utilisée pour améliorer simultanément les caractéristiques aérodynamiques et structurelles des profils à partir de méthodes de calculs numériques (CFD et éléments finis). Elle permet ainsi de trouver l'optimum local à proximité d'une bonne solution en phase de conception détaillée.

Mais ce n'est qu'un début car la MDO peut également trouver une bonne solution quand celle-ci est très difficile à imaginer et que les variables de nature diverse interdisent tout calcul de dérivée (type de profil, nombre et type de moteur, etc.).

Ainsi les avions de ligne de demain n'auront probablement plus rien à voir avec la forme longtemps optimisée du vénérable Boeing 707, conçu il y a plus d'une soixantaine d'années.

1. Introduction

Outre la recherche de similarités dans d'importants jeux de données, l'optimisation multidisciplinaire^{7 8} (*MDO : Multidisciplinary Design Optimisation*) constitue une autre facette largement méconnue du Big Data, en dépit de ses considérables enjeux.

Cherchant un optimum de conception entre divers métiers, la MDO peut se faire de différentes manières. La *Collaborative Optimisation* (CO) multiniveaux⁹ consiste, par exemple, à utiliser un optimiseur global pilotant des optimiseurs propres à chacune des disciplines.

La MDO est déjà utilisée en aéronautique pour améliorer des formes aérodynamiques et trouver l'optimum local à proximité d'une bonne solution par une méthode efficace d'estimation du gradient¹⁰ (méthode de l'état adjoint). Cependant, cette recherche ne peut être menée en conception préliminaire quand une bonne solution est difficile à imaginer et que les variables sont de nature diverse.

Les métaheuristiques (algorithmes génétiques, recuit simulé, etc.) sont alors les seules options disponibles en dépit de leur très lente convergence vers un optimum global qui n'est, par ailleurs, pas garanti.

⁷ Vanderplaats, G. N., *Multidiscipline Design Optimization*, Vanderplaat R&D, Inc., 2007.

⁸ Cramer E. J., Dennis J. E., Frank P. D., Lewis R. M., Shubin G. R., *Problem formulation for multidisciplinary optimization*, SIAM Journal on Optimization, 4 :754776, 1993.

⁹ Parte Y., Auroux D., Clément J., Masmoudi M., Hermetz J., *Collaborative optimization*, pp. 321–368, Multidisciplinary design optimization in computational mechanics, Wiley-ISTE, April 2010.

¹⁰ Achard T., *Techniques de calcul de gradient aéro-structure haute-fidélité pour l'optimisation de voilures flexibles*. Génie civil. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2017.

Cependant, leur hybridation avec des méthodes locales (algorithme de Nelder-Mead, etc.) accélère fortement leur convergence du fait de la capacité d'exploration locale beaucoup plus rapide de ces dernières.

Par ailleurs, la simulation de Monte-Carlo apparaît souvent incontournable pour évaluer les systèmes complexes en dépit des temps de traitement. Cependant des couplages efficaces entre les divers algorithmes permettent d'utiliser cette dernière sans conduire à des durées de calcul rédhibitoires.

Ce livre didactique cherche d'abord à vulgariser les techniques d'optimisation aux non-spécialistes avant de les initier à l'optimisation multidisciplinaire.

Il illustre son propos de nombreux exemples traités par un outil fondé sur l'hybridation d'algorithmes génétiques et d'une méthode d'optimisation locale (Gencab).

Il montre notamment des applications dans le domaine aéronautique en soulignant les limites des méthodes et outils existants.

Il essaye enfin de présenter des axes de travail et des ébauches de spécification dans le but de développer un outil générique qui puisse surmonter les limitations actuelles et répondre à la plupart des problématiques et besoins auxquels les ingénieurs sont confrontés quand ils essayent de mettre en œuvre la MDO lors de la conception de leurs systèmes.

Ce projet de développement collaboratif d'un outil en open-source (Gencab Indra) cherche à fédérer une communauté de chercheurs, développeurs, industriels et donneurs d'ordres autour de l'optimisation multidisciplinaire. Exploitant les récentes technologies issues de l'Internet (*cloud computing*, micro-service et conteneurisation, etc.) et du Big Data (management de cluster et calculs parallèles et distribués), ce projet veut offrir aux concepteurs et analystes une manière simple et accessible de définir leur problème d'optimisation grâce à une large palette de formats de variables et de pouvoir aisément imbriquer entre eux, selon différents niveaux hiérarchiques, un ensemble d'algorithmes d'optimisation locale et globale afin d'aboutir à une conception optimale dans un temps raisonnable.

5. Conclusion

Beaucoup moins connue que d'autres activités dans la mouvance du Big Data, l'optimisation multidisciplinaire prépare une véritable révolution des produits et de leurs performances qui risque d'élargir encore un peu plus le fossé technologique séparant les organisations en marche de celles à la traîne.

Elle permet d'ores et déjà d'améliorer, bien qu'encore à la marge, certains produits complexes, tels que les avions, mais pourrait demain faire émerger de nouvelles configurations de solutions totalement différentes et probablement très éloignées des schémas souvent préétablis dans l'industrie.

Cette révolution se propage aux domaines de conception automobile, navale, électronique et informatique et n'épargnera probablement aucun secteur.

Cependant les fruits de la conception optimale se font toujours attendre au regard des prévisions et attentes suscitées à ses débuts.

Les méthodologies existent mais les outils retardent, ce qui donne tout son sens au projet de développement collaboratif dédié à l'optimisation multidisciplinaire, Gencab Indra, qui est proposé dans le présent ouvrage.

L'OPTIMISATION MULTIDISCIPLINAIRE, L'AUTRE ENJEU DU BIG DATA

Outre ses applications les plus visibles (profilage publicitaire, diagnostic, *Health monitoring*, maintenance prédictive, voiture autonome...), un aspect méconnu du Big Data devrait bientôt engendrer des innovations de rupture dans tous les domaines d'activité.

Capable d'explorer l'espace infini des solutions possibles sans rechercher de mauvais compromis entre les divers métiers, l'optimisation multidisciplinaire (MDO : *Multidisciplinary Design Optimisation*) est, en effet, susceptible d'améliorer considérablement les performances et caractéristiques des produits de demain.

Elle est déjà utilisée en aéronautique pour améliorer, à la marge, les caractéristiques aérodynamiques et structurelles des profils en phase de conception détaillée. Elle sera bientôt étendue à la conception amont pour faire émerger des solutions radicalement différentes avec des résultats bien plus satisfaisants.

Ce livre didactique cherche à vulgariser les techniques de l'optimisation et les applications les plus courantes, avant de proposer des méthodes génériques, efficaces, et simples d'utilisation avec le projet de développement collaboratif Gencab Indra dédié à l'optimisation multidisciplinaire.



Ingénieur en informatique, avec une formation en électronique et traitement du signal, et travaillant sur de multiples projets ayant trait à l'IoT et au Big Data, Adrien Cabarbaye, est le chef de projet de la plateforme Gencab Indra d'optimisation multidisciplinaire.



Docteur ingénieur en aéronautique, Aurélien Cabarbaye a mené de nombreux travaux de recherche au moyen d'outils d'optimisation hybrides. Il a notamment conçu et développé plusieurs configurations originales de drones de type avion, hélicoptère et convertible.

ISBN : 979-10-97287-05-4



9 791097 287054

Prix : 49 € TTC