

Développement conceptuel de protections balistiques fondé sur l'optimisation

Giovanni Garofalo¹, Patrice Longère¹, Kamel Moussaoui¹

¹Institut Clément Ader, CNRS, INSA, ISAE-SUPAERO, IMT Mines Albi, Université de Toulouse

Résumé — L'étude propose une méthodologie numérique pour concevoir des systèmes de protection balistique passive en se basant sur des « fonctions » à satisfaire, par exemple l'érosion du projectile, l'absorption des ondes de choc et de l'énergie, ainsi que l'arrêt des fragments. La méthodologie, fondée sur la corrélation simulation-expérience, utilise Abaqus/Explicit et SIMULIA ISIGHT pour optimiser la masse et la vitesse résiduelle après l'impact. L'optimisation concerne à la fois le choix des matériaux et leur répartition à travers l'épaisseur pour maximiser la performance du blindage.

Mots clefs — Balistique, Simulation, Optimisation.

1. Introduction

Les problèmes balistiques constituent un enjeu majeur dans la conception et la protection des structures soumises à des impacts à grande vitesse. Ces phénomènes peuvent entraîner des dommages irréversibles, voire des défaillances structurelles en cascade. Ils englobent notamment les impacts de munitions sur les véhicules blindés, de grêle sur les aéronefs, ainsi que de débris sur les satellites. Les différents mécanismes de perforation sont répertoriés dans [1]. La complexité des systèmes de protection balistique a considérablement évolué. Les solutions initialement monolithiques ont laissé place à des configurations plus élaborées, reposant sur des structures multicouches et multi-matériaux, capables de s'adapter à des niveaux de menace toujours plus exigeants. La conception de tels systèmes nécessite une approche rigoureuse afin d'obtenir un compromis optimal entre légèreté, résistance et coût. En effet, les matériaux traditionnels répondent généralement à des caractéristiques prédéfinies, par exemple haute résistance pour une haute densité (voir Fig. 1a). Dans cette optique, le présent travail vise à développer une méthodologie numérique pour la conception d'un système de protection passif, selon une approche fonctionnelle basée sur des « fonctions balistiques » à respecter (voir Fig. 1b).

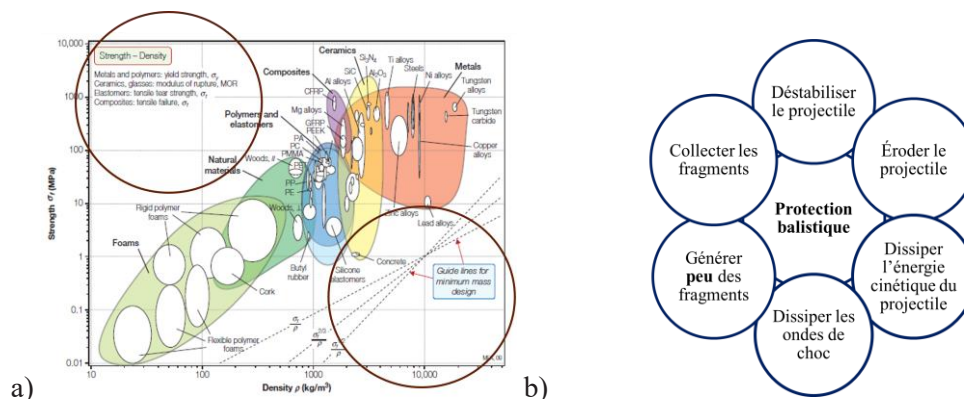


Figure 1 a) La résistance σ_f en fonction de la masse volumique ρ . [2] Les cercles rouges mettent en évidence des vides techniques. b) « Fonctions balistiques » élaborées à partir de [3].

2. Méthodologie

Comme première étape, une plaque est étudiée sous impact balistique au moyen du code de calcul par éléments finis ABAQUS/Explicit. Les performances du couple menace-protection sont caractérisées à l'aide de la vitesse limite balistique, notée v_{bl} , définie comme la vitesse en-deçà de laquelle le projectile ne perce pas la protection et au-delà de laquelle il la perce. Le problème aux limites et à valeurs initiales considéré est l'impact d'un projectile NATO 7,62 contre une plaque en alliage d'aluminium. Les conditions et les paramètres de simulation sont présentées dans les Tableaux 1 et 2.

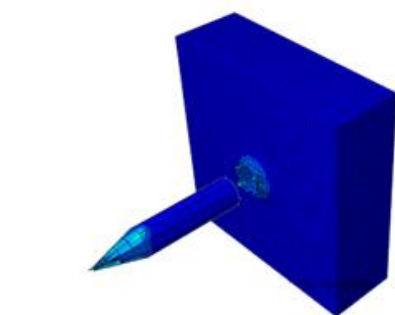
Tableau 1 Paramètres ABAQUS/Explicit de création du projectile.

| Projectile | |
|---------------------|--------------------------------------|
| Module ABAQUS | Valeur |
| Part | 3D, Déformable |
| Property | Acier 4340H, JC Modèle |
| Interaction | Surface-to-Surface |
| Boundary conditions | $U1 = U2 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$ |
| Initial conditions | Vitesse $V_i = 700 \text{ m.s}^{-1}$ |
| Mesh | 0,009, HEX, Sweep |

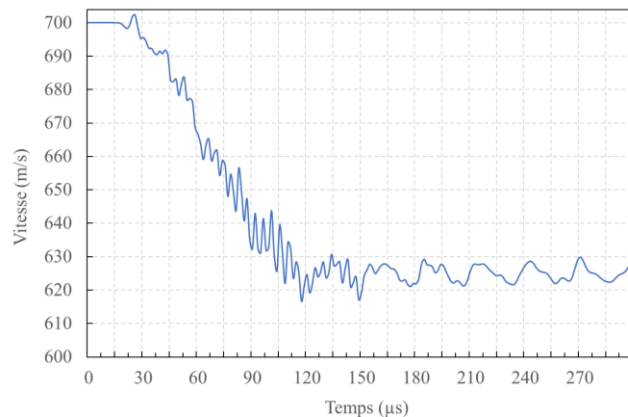
Tableau 2 Paramètres ABAQUS/Explicit de création de la plaque.

| Plaque | |
|---------------------|------------------------|
| Module ABAQUS | Valeur |
| Part | 3D, Déformable |
| Property | Al5083-H116, JC Modèle |
| Interaction | Surface-to-Surface |
| Boundary conditions | Encastre (bords) |
| Mesh | 0,002, HEX, Structuré |

La Fig.2a montre le modèle mis en place avec une balle qui perce la plaque. Étant donné qu'il s'agit d'une étude préliminaire, l'évaluation des deux dimensions globales de la plaque, notamment sa hauteur et sa longueur, n'a pas été jugée nécessaire. En effet, la zone d'impact considérée est relativement réduite, ce qui rend l'influence des dimensions latérales négligeable sur la réponse locale du matériau. Selon sa vitesse initiale, la balle est arrêtée dans la plaque ou la perce. Dans la Fig.2b est tracée la vitesse de la balle en fonction du temps. On constate, selon le maillage imposé, que pour une vitesse initiale $v_i = 700 \text{ m.s}^{-1}$, la vitesse résiduelle v_r est de l'ordre de 625 m.s^{-1} . Cette simulation va servir d'expérience 'virtuelle' pour la calibration des paramètres matériau de la plaque.



a)



b)

Figure 2 a) Image numérique de la perforation d'une cible. b) Vitesse numérique de la balle (m.s^{-1}) en fonction du temps (μs). La vitesse résiduelle correspond à la vitesse stabilisée du projectile après perforation.

Le comportement thermo-viscoplastique de la plaque et sa rupture sont décrits par les modèles de Johnson-Cook, voir [4] et [5] :

$$\sigma_y(\kappa, \dot{\kappa}, T) = (A + B\kappa^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\kappa}}{\dot{\kappa}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

$$\kappa_f(\eta_\Sigma, \dot{\kappa}, T) = (D_1 + D_2 \exp(-D_3 \eta_\Sigma)) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\kappa}}{\dot{\kappa}_0} \right) (1 + D_5 T^{*m}) \quad (2)$$

Où σ_y et κ_f représentent la contrainte d'écoulement et la déformation plastique cumulée à rupture, κ et T la déformation plastique cumulée et la température, η_Σ le taux de triaxialité des contraintes, A, B, C, n, m, $\dot{\kappa}_0$, $D_1 - D_5$ des constantes. Dans une première approximation, seuls A, B, n et D_1 sont non nuls. On a donc :

$$\begin{aligned} \sigma_y(\kappa) &= A + B\kappa^n \\ \kappa_f &= D_1 \end{aligned} \quad (3)$$

On s'intéresse aussi à l'évaluation des performances de certains algorithmes d'optimisation disponibles dans l'environnement ISIGHT (Simulia®). Pour ce faire, on définit une procédure de calibration de paramètres matériau. Dans un premier temps, nous créons une expérience 'virtuelle' par simulation numérique et nous voulons vérifier que la calibration qui suit fournit bien les valeurs des paramètres matériau précisément utilisées pour l'expérience 'virtuelle'. L'idée est en effet d'évaluer les performances de deux algorithmes d'optimisation disponibles dans l'environnement ISIGHT. La phase de calibration au moyen d'ISIGHT consiste à trouver un jeu de paramètres (A, D_1) satisfaisant dans une première approche :

$$\sigma_y(0) \cdot \kappa_f = A \cdot D_1 = W \quad (4)$$

où W est une constante assimilable à l'énergie de déformation plastique à rupture (dans laquelle l'écrouissage n'est pas pris en compte). La courbe A(D_1) est tracée en bleu sur le graphe de la Fig.3. Le couple (A=170MPa, $D_1=0,26$), utilisé pour la simulation numérique de référence (l'expérience 'virtuelle') est représenté par un cercle vert sur la Fig.3a. Les triangles et étoiles de couleur sur la Fig.3a correspondent aux couples (A, D_1) donnés au départ du processus de calibration dans ISIGHT. Les bornes sont également indiquées.

Le diagramme en Fig.3b illustre le processus itératif de calibration numérique appliqué à la conception de systèmes de protection balistique. Il combine des approches de simulation numérique avec une logique d'optimisation visant à atteindre la vitesse résiduelle de référence. Le processus commence par une phase de démarrage ou de redémarrage, suivie d'une étape de définition du design où les méthodes, les variables, les contraintes et les objectifs sont précisés. Ensuite, une analyse numérique est lancée à l'aide des logiciels mentionnés, si les contraintes imposées sont respectées. Les résultats de simulation permettent d'extraire la vitesse résiduelle, qui est ensuite comparée à l'objectif prédéfini. Si l'objectif est atteint, les résultats sont extraits et la simulation se termine ; sinon, une nouvelle mise à jour des variables est réalisée, relançant le cycle d'optimisation.

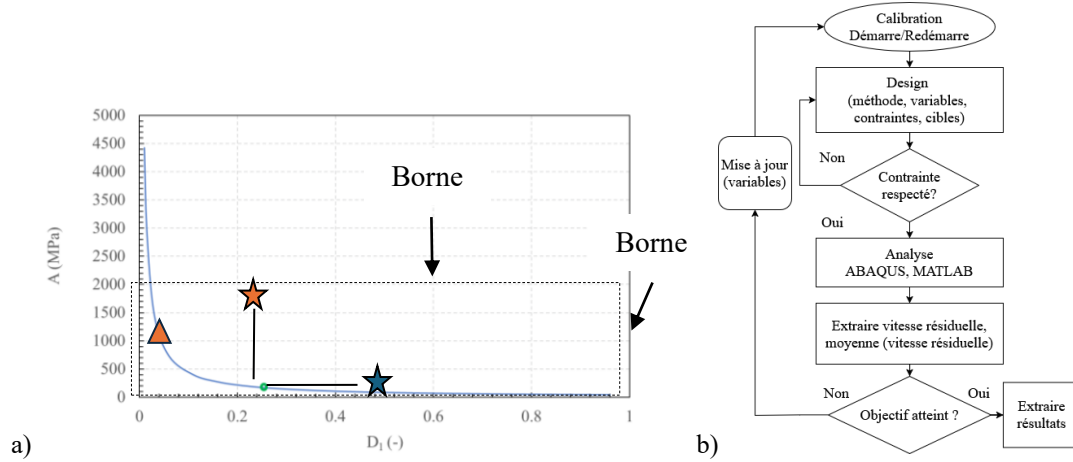


Figure 3 a) Relation entre la résistance A et la déformation plastique à rupture D_1 . Les triangles et étoiles de couleur correspondent aux couples (A, D_1) au départ du processus de calibration, et les bornes de sortie d'optimisation sont arbitraires. b) Représentation de la boucle de calibration dans ISIGHT.

En considérant la notation d'ISIGHT, le problème peut s'écrire

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimiser} & f(A, D_1) = \sqrt{(v_r(A, D_1) - v_r^{cible})^2 + q^2} - q \\
 \text{sous la contrainte} & A \cdot D_1 = W \\
 \text{avec les variables} & A, D_1 \\
 \text{et les bornes} & A_{\min} \leq A \leq A_{\max}, D_{1,\min} \leq D_1 \leq D_{1,\max}
 \end{array}$$

où $q = 0,2$ et $v_r^{cible} = 625 \text{ m.s}^{-1}$. Cette formulation reprend le problème général d'optimisation simplifié [6]:

$$\begin{array}{l}
 \min f(x) \\
 x \in \mathbb{R}^n : g_j(x) = 0, j = 1, \dots, m_e \\
 g_j(x) \geq 0, j = m_e + 1, \dots, m
 \end{array} \quad (5)$$

où $f(x)$ et $g_j(x), j = 1, \dots, m$ sont continuellement différentiable dans \mathbb{R}^n .

On a évalué les performances de deux méthodes largement utilisées : NLPQLP [7] et Downhill Simplex [8]. Une formulation générale NLPQLP est un algorithme d'optimisation non linéaire basé sur le gradient. À chaque itération, le problème non linéaire est approximé par un sous-problème quadratique obtenu par une linéarisation des contraintes et une approximation quadratique du Lagrangien. La fonction objectif est pénalisée dès qu'une itération quitte le domaine admissible. Les paramètres de pénalité correspondants, qui contrôlent le degré de violation des contraintes, doivent être soigneusement choisis pour garantir une direction de descente de la fonction de mérite. NLPQLP est efficace lorsque la fonction objectif est continue, différentiable et faiblement bruitée, et permet une convergence rapide vers un optimum local. En revanche, sa performance dépend du point initial et des paramètres numériques, ce qui peut conduire à une convergence prématurée vers un minimum local non désiré. À l'inverse, la méthode Downhill Simplex est un algorithme sans gradient. Elle repose sur la manipulation d'un simplexe géométrique à $(n+1)$ sommets dans un espace de dimension n . À chaque itération, le simplexe est modifié par une succession d'opérations géométriques, c'est-à-dire

réflexion, expansion, contraction et réduction, visant à déplacer la région de recherche vers des valeurs plus faibles de la fonction objectif. La réflexion, opération la plus courante, consiste à remplacer le sommet correspondant à la plus mauvaise valeur de la fonction objectif par un point symétrique par rapport à la face opposée du simplexe. Elle ne nécessite aucune information sur les dérivées et évalue uniquement la fonction objectif, ce qui la rend particulièrement adaptée aux problèmes non différentiables, discontinus, bruités ou pour lesquels le calcul du gradient est coûteux ou impossible. En contrepartie, la convergence est généralement plus lente et moins précise que celle des méthodes à gradient, et aucune garantie formelle de convergence vers un optimum global n'est fournie.

3. Résultats

Au terme des simulations effectuées, les résultats confirment la capacité du logiciel à atteindre assez précisément la solution de référence. Cette performance est toutefois fortement conditionnée par le choix des paramètres de simulation, parmi lesquels : les bornes des variables d'optimisation choisies, le nombre maximum d'itérations autorisées, la taille et la précision du pas de recherche, les points de gradient explorés, la taille du domaine de recherche, ainsi que les valeurs de pénalité et de la fonction objectif. Ces résultats mettent en lumière l'importance d'un calibrage précis et méthodique des paramètres d'entrée. En effet, l'algorithme (compte tenu des contraintes et des tolérances) n'est pas complètement capable d'obtenir la vitesse résiduelle de la simulation de référence, notamment, $V_{res}=625m.s^{-1}$, mais il en obtient une valeur assez proche, c'est-à-dire $V_{opt}=626,3m.s^{-1}$ (Fig.4a). Dans ce cas, par rapport à la simulation de référence, l'erreur absolue sur cette valeur est d'environ $1,3m.s^{-1}$, et l'erreur relative est d'environ $0,208\%$, autrement dit négligeable. La tendance de W , visible en Fig.4b, tient compte d'une tolérance (imposée) sur la même valeur de $\pm 0\%$ (cette valeur a été considérée pour les deux méthodes).

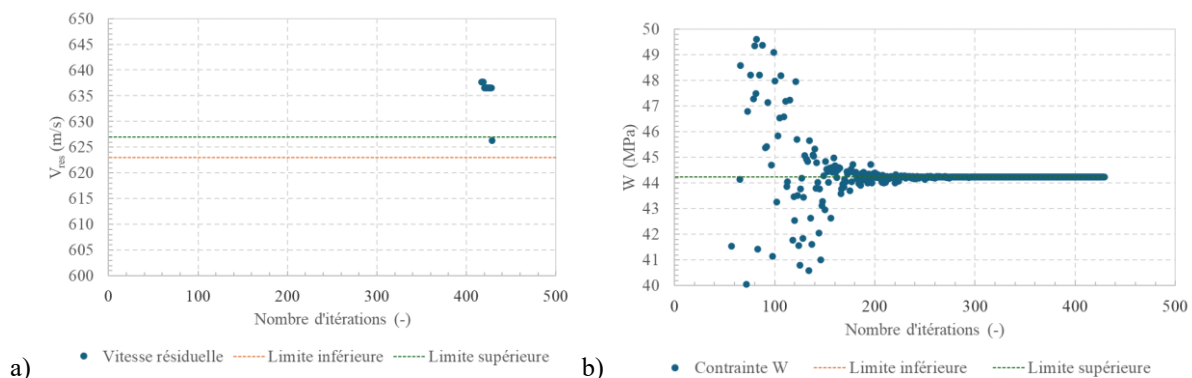


Figure 4 Tendances (ISIGHT) pour a) la vitesse résiduelle V_{res} et b) W en fonction de nombre d'itérations (méthode utilisée : Downhill Simplex).

En même temps, on a pu évaluer les paramètres A et D_1 (Figs.6a, 6b) qui déterminent les résultats précédents. Par rapport à la simulation de référence, l'erreur absolue sur A est d'environ $21MPa$, et l'erreur relative est d'environ $12,3\%$. L'erreur absolue sur D_1 est d'environ $0,03$, et l'erreur relative est d'environ $11,5\%$. Ces résultats indiquent qu'il y a plusieurs points A , D_1 près de la simulation de référence qui vérifient la contrainte W .

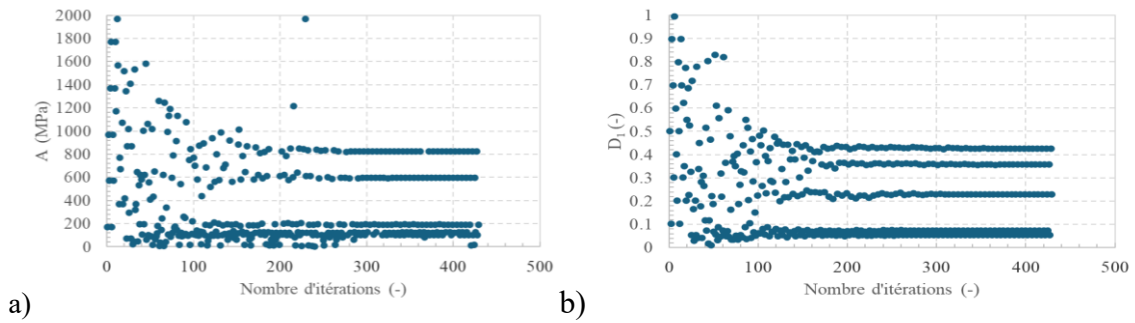


Figure 5 Tendances (ISIGHT) pour a) A et b) D_1 en fonction de nombre d'itérations (méthode utilisée : Downhill Simplex). L'asymptote horizontale identifie le point optimal.

La comparaison entre la vitesse résiduelle obtenue avec les deux méthodes n'a pas été possible : la méthode NLPQLP n'atteint jamais la vitesse résiduelle de référence, et les résultats ne se trouvent pas entre les bornes choisies pour la simulation, i.e., $V_{res} \pm 2m.s^{-1}$ à cause des optima locaux trouvés pendant les simulations, c'est pour ça qu'on a choisi de ne pas montrer ces résultats; avec la méthode Downhill Simplex (Fig. 6), la vitesse résiduelle de référence n'est jamais atteinte, mais les résultats se trouvent toujours à l'intérieur des bornes imposées.

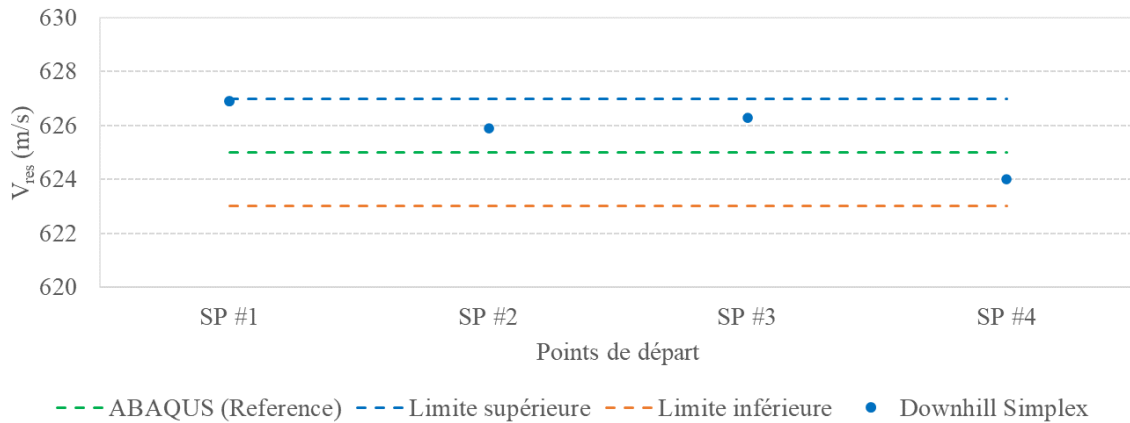


Figure 6 Convergence de la vitesse résiduelle : Downhill simplex. SP = « Starting point ».

4. Conclusion

La calibration réalisée à l'aide de la méthode Downhill Simplex a permis de retrouver avec une bonne précision les paramètres matériau utilisés dans la simulation de référence. Cette méthode s'est révélée efficace pour converger vers une solution stable, même en présence d'un espace de recherche non linéaire. En revanche, la méthode NLPQLP n'a pas permis d'atteindre les mêmes performances : la convergence s'est avérée plus sensible aux conditions initiales et la solution finale présente un écart notable par rapport aux valeurs de référence. Ces résultats suggèrent que, pour ce type de problème où la fonction objective peut être non dérivable ou irrégulière, la méthode Downhill Simplex constitue une approche plus adaptée. Sur la base de ces conclusions, la prochaine étape du travail consistera à étendre cette démarche d'optimisation à un système de protection passif multicouche, dans le but d'identifier la configuration optimale des matériaux et des épaisseurs assurant le meilleur compromis entre résistance balistique et légèreté de la structure.

Références

- [1] J. A. Zukas. Impact dynamics: theory and experiment, US Army Armament Research and Development Command, 1–67, 1980.
- [2] M. F. Ashby. Materials selection in mechanical design, Elsevier, 2011.
- [3] Y. Cosquer, P. Longère, O. Pantalé, C. Gailhac. Experiment/simulation correlation-based methodology for metallic ballistic protection solutions, Defence Technology, KeAi/Elsevier, 24–38, 2023.
- [4] G. R. Johnson, W. H. Cook. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures. Proceedings 7th International Symposium on Ballistics, 541–547, 1983.
- [5] G. R. Johnson, W. H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, 1–48, 1985.
- [6] K. Schittkowski, NLPQLP: A Fortran Implementation of a Sequential Quadratic Programming Algorithm with Distributed and Non-Monotone Line Search - User's Guide, Version 4.2, 2015.
- [7] C. M. Chilan, B. L. Mesmer. Use of the NLPQLP Sequential Quadratic Programming Algorithm to Solve Constrained Optimization Problems (NASA Technical Report No. NASA/TM–2018–220025). National Aeronautics and Space Administration, 2018.
- [8] J. A. Nelder, R. Mead. A Simplex Method for Function Minimization, The Computer Journal, 308–313, 1965.