SARL CAB INNOVATION | NOTE TECHNIQUE D'INGÉNIERIE SYSTÈME & MDO

INTERFAÇAGE DE CAB DESIGNER AVEC DES CODES DE CALCUL EXTERNES
Architecture des Échanges, Protocole Séquentiel et Cas d'Application Industriels

RÉFÉRENCE : NT-CAB-EXT-2026-006 | **DATE :** 4 novembre 2026 | **AUTEUR :** SARL CAB INNOVATION | **DIFFUSION :** Ingénierie Système, Aérodynamique, Spatial & SdF |

1. Contexte et Enjeux Industriels de l'Interfaçage Externe

Dans les cycles de développement des systèmes aérospatiaux, maritimes et énergétiques complexes, la conception optimale multidisciplinaire (MDO - Multidisciplinary Design Optimization) confronte systématiquement l'ingénieur à un arbitrage méthodologique fondamental :

- **L'environnement tableur (Microsoft Excel®) :** permet de consolider avec une flexibilité inégalée les bilans de masse, les équations géométriques paramétrées, les modèles économiques de coût de cycle de vie (LCC) et les arbres de contraintes de navigabilité ou de mission.
- **Les solveurs scientifiques spécialisés (BEM, CFD, Vortex Lattice, FEA, réseaux de Petri stochastiques) :** concentrent la physique de haute fidélité indispensable pour évaluer les coefficients aérodynamiques, les tenseurs de contrainte structuraux ou les probabilités d'événements redoutés.

Le progiciel Cab Designer Version 3 comble cette frontière logicielle en intégrant une passerelle universelle d'interfaçage par fichiers d'échange ASCII et pilotage en ligne de commande (CLI). En déléguant l'évaluation physique à des exécutables autonomes sous Windows tout en pilotant l'exploration de l'espace de conception par son moteur d'optimisation hybride (Algorithmes Génétiques pour l'exploration globale non convexe relayés par le simplexe de Nelder-Mead pour le raffinement local fin), Cab Designer transforme un classeur Excel standard en une plateforme MDO industrielle de premier ordre.

2. Architecture Séquentielle et Protocole d'Échange Cab Designer

L'activation du mode d'interfaçage avec des applications externes est régie par la présence d'une variable nommée globale dans le classeur Excel :

```
External_Application = 1
```

Le protocole de communication repose sur les premières colonnes de la feuille active (colonnes A, B, C, etc.), exécutées séquentiellement de gauche à droite à chaque évaluation d'un individu candidat généré par le solveur d'optimisation ou lors des tirages de Monte-Carlo.

2.1 Cycle complet d'une évaluation

Chaque cycle d'évaluation respecte scrupuleusement le séquencement logique suivant :

- **1. Action Calculation All :** Recalcul forcé de l'ensemble du classeur pour propager les valeurs du vecteur de décision X (table DATA) dans les formules de discrétisation physique.
- **2. Action Delete :** Suppression préventive du fichier de résultats cible généré lors de l'itération précédente, éliminant tout risque de faux positif en cas de non-convergence du solveur externe.
- **3. Actions Write :** Génération dynamique sur le disque des fichiers d'entrée ASCII (géométrie, polaires, conditions aux limites) et des scripts batch d'exécution (.bat, .cmd).
- **4. Action LaunchWait (ou LaunchScript) :** Exécution sous Windows du solveur externe avec suspension bloquante d'Excel jusqu'à terminaison complète du calcul.
- **5. Action Calculation All :** Recalcul de synchronisation des flux d'E/S système.
- **6. Action Read :** Ingestion séquentielle ligne à ligne du fichier texte de résultats produit par le solveur dans les cellules de la colonne.
- **7. Action Calculation All :** Dépouillement des grandeurs physiques par chaînes de texte, évaluation des contraintes et synthèse de la fonction globale d'objectif pénalisée.

2.2 Répertoire exhaustif des primitives d'action

Action (Ligne 1)	Cible / Commande (Ligne 2)	Description fonctionnelle et mécanisme bas niveau
Calculation	All (ou vide)	Force le recalcul intégral du classeur (Application.CalculateFull). Indispensable avant l'écriture des fichiers pour actualiser les géométries avec les nouveaux gènes.
Delete	Chemin complet du fichier	Supprime le fichier physique cible avant exécution. Prévient toute lecture résiduelle d'un résultat antérieur si le solveur externe plante.
Write	Chemin complet du fichier	Exporte le contenu textuel des cellules sous-jacentes (lignes 3 à N) dans un fichier texte brut ASCII. L'écriture s'interrompt dès la première cellule vide.
Launch	Ligne de commande CLI	Exécute l'application en tâche de fond de manière asynchrone (non bloquante pour Excel).
Wait	Durée en secondes	Intercale une temporisation fixe avant de passer à la colonne d'action suivante.
LaunchWait	Commande CLI complète	Lance le solveur externe et bloque l'exécution d'Excel jusqu'à restitution du code de retour du processus (ExitCode = 0).
Read	Chemin complet du fichier	Ouvre le fichier texte produit par le solveur et recopie ses lignes successivement dans les cellules de la colonne (lignes 3, 4, 5, etc.).

3. Premier Exemple Industriel : Optimisation Aéro-propulsive d'une Hélice de Drone sous Qprop

3.1 Problématique Aérodynamique et Formulation Mathématique

L'étude porte sur la conception optimale d'une hélice bipale en fibre de carbone (rayon hors-tout R_tip = 0,150 m, rayon du moyeu R_hub = 0,020 m) destinée à la propulsion d'un drone de surveillance aérienne évoluant en vol de croisière à vitesse constante V = 15,0 m/s sous une alimentation batterie LiPo 3S (U = 11,1 V).

Le solveur aérodynamique retenu est Qprop Version 1.22 (Mark Drela, MIT), qui implémente une théorie de l'élément de pale étendue (Blade Element Momentum - BEM) couplée à une formulation de sillage hélicoïdal tourbillonnaire. Le code intègre nativement les corrections de pertes en bout de pale de Prandtl, les effets de vrillage induit, le modèle de traînée de profil à bas nombre de Reynolds et l'équilibre électromécanique du moteur brushless.

Formulation mathématique du problème d'optimisation sous contraintes

Le problème consiste à minimiser la puissance mécanique absorbée sur l'arbre (équivalente à la puissance électrique pour un moteur donné) tout en garantissant la poussée axiale nécessaire au maintien du palier de vol et un rendement propulsif minimal :

```
Minimiser :       f(X) = P_shaft(X)   [Watt]
Sous contraintes : C1(X) = T(X) >= 3,50 N      (Poussée minimale requise)
                   C2(X) = eta_prop(X) >= 50 % (Rendement propulsif minimal)
                   c_min <= c(r) <= c_max      (Bornes géométriques de corde)
                   beta_min <= beta(r) <= beta_max (Bornes de calage de vrillage)
```

Paramétrisation de la pale (Vecteur de décision X dans la table DATA)

Afin d'assurer la régularité surfacique de l'hélice et d'éviter les singularités d'usinage, les lois de corde c(r) et de vrillage beta(r) sont régies par 3 sections de contrôle (moyeu, mi-envergure, saumon) interpolées paraboliquement (B-Splines) sur 9 stations de calcul (de r1 = 0,020 m à r9 = 0,150 m). Le vecteur X comporte 6 variables réelles continues :

Paramètre	Type	Borne Min	Borne Max	Valeur Initiale	Rôle géométrique / physique
c_root	Real	0,015 m (15 mm)	0,040 m (40 mm)	0,0280 m	Corde à l'emplanture (résistance structurale au pied de pale)
c_mid	Real	0,012 m (12 mm)	0,035 m (35 mm)	0,0220 m	Corde à mi-envergure (zone de contribution maximale à la poussée)
c_tip	Real	0,005 m (5 mm)	0,020 m (20 mm)	0,0100 m	Corde au saumon (atténuation du vortex marginal et traînée induite)
beta_root	Real	15,0 °	45,0 °	28,0 °	Angle de calage à l'emplanture (adaptation à la faible vitesse circonférentielle)

beta_mid	Real	10,0 °	35,0 °	18,0 °	Angle de calage à mi-envergure (incidence de portance maximale Cl/Cd)
beta_tip	Real	5,0 °	25,0 °	10,0 °	Angle de calage en bout de pale (washout d'extrémité contre le décrochage)

3.2 Architecture d'Interfaçage dans le Classeur Helice_QPROP.xlsx

Le flux d'échanges séquentiels est déployé sur les 9 premières colonnes de la feuille Model :

Col.	Action	Cible / Fichier	Détail opérationnel et formules Excel
A	Calculation	All	Recalcul complet des formules des 9 stations de pale (lignes C12:C20) à partir des gènes X de la table DATA.
B	Delete	pathFolder\results.txt	Suppression préventive de results.txt pour interdire la relecture d'une itération passée.
C	Write	pathFolder\propeller.dat	Génération dynamique du fichier géométrique propeller.dat (18 lignes ASCII : en-têtes polaires, constantes moteur et tableau des 9 sections).
D	Write	pathFolder\motor.dat	Écriture des paramètres du moteur brushless (R = 0,18 Ohm, Io = 0,65 A, Kv = 920 rpm/V).
E	Write	pathFolder\run_qprop.bat	Génération du script batch de commande appelant Qprop et de la commande d'extraction des 7 variables via boucle for/f et filtre findstr.
F	LaunchWait	cmd.exe /c run_qprop.bat	Exécution bloquante sous le shell Windows. Excel reste gelé jusqu'à la fin de l'écriture de results.txt.
G	Calculation	All	Synchronisation des flux d'E/S système et rafraîchissement des pointeurs de fichiers.
H	Read	pathFolder\results.txt	Ingestion successive des 7 valeurs de vol dans les cellules H3 à H9.
I	Calculation	All	Conversion numérique via VALUE(SUBSTITUTE(..., '.', ',')), alimentation des cellules AL14:AL20 et calcul de l'Objective pénalisée.

Script batch d'exécution et analyse lexicale (Cellule E5)

L'exécutable Qprop v1.22 préfixant la ligne de vol par un dièse (# 15.000 5800. ...), les variables utiles sont décalées d'un token. La commande batch intégrée en cellule E5 gère parfaitement ce décalage tout en intégrant une initialisation de repli pénalisante :

```
(echo 0.0 & echo 999.0 & echo 999.0 & echo 0.0 & echo 0.0 & echo 0.0 & echo 0.0) > results.txt & for /f "tokens=1-16" %%a in ('findstr /c:"15.000" raw_output.txt') do ((echo %%e & echo %%g & echo %%g & echo %%k & echo %%k & echo %%c & echo %%f) > results.txt)
```

Correspondance des tokens extraits : %%e = Poussée T (N), %%g = Puissance P_shaft (W), %%k = Rendement propulsif eta_prop, %%c = Régime de rotation N (rpm), %%f = Couple aérodynamique Q (N.m).

3.3 Analyse des Résultats d'Optimisation

Après 20 générations de l'algorithme génétique couplées à l'activation du simplexe de Nelder-Mead à 50 % des boucles, la convergence est atteinte :

Grandeur physique / Paramètre	État Initial	Optimum Cab Designer	Gain / Interprétation aérodynamique
Corde emplanture (c_root)	28,0 mm	20,5 mm	- 26,8 % : Amincissement pour réduire la traînée de culot au moyeu
Corde mi-envergure (c_mid)	22,0 mm	16,0 mm	- 27,3 % : Ajustement optimal de la surface de portance locale
Corde saumon (c_tip)	10,0 mm	5,7 mm	- 43,0 % : Affinement extrême atténuant le tourbillon marginal
Vrillage emplanture (beta_root)	28,0 °	36,5 °	+ 8,5 ° : Forte augmentation du pas pour capter le flux incident axial
Vrillage mi-envergure (beta_mid)	18,0 °	23,3 °	+ 5,3 ° : Maintien de l'incidence optimale de finesse Cl/Cd = 22
Vrillage saumon (beta_tip)	10,0 °	6,1 °	- 3,9 ° : Délestage aérodynamique réduisant la traînée induite
Poussée axiale totale (T)	1,22 N (non conforme)	3,503 N	+ 187 % : Contrainte >= 3,5 N strictement satisfaite à l'optimum
Puissance mécanique (P_shaft)	48,2 W	73,43 W	Puissance minimale garantissant le palier de vol à V = 15 m/s

Rendement de l'hélice (eta_prop)	61,2 %	71,56 %	+ 10,36 points : Gain très net d'efficacité de conversion énergétique

Couplage Qprop - Cab Designer (Optimisation d'hélice / rotor drone)

Chemin d'accès de Qprop :	C:\Qprop	
Chemin du projet :	C:\Qprop\Projet_Drone	
Vitesse de vol (Vitesse) :	15,0	m/s
Tension batterie (Volt) :	11,1	V
Rayon bout de pale (R_tip) :	0,15	m
Rayon moyeu (R_hub) :	0,02	m
Nombre de pales (Nblades) :	2	
Masse volumique (rho) :	1,225	kg/m3
Poussée minimale requise :	3,5	N

DATA	1	2	3	4	5	6
Name	c_root	c_mid	c_tip	beta_root	beta_mid	beta_tip
Type	Real	Real	Real	Real	Real	Real
Min / k	0,015	0,012	0,005	15	10	5
Max / n	0,04	0,035	0,02	45	35	25
Init / End	0,020520681	0,015975579	0,005705848	36,46196763	23,32553628	6,124714941

Poussée (Thrust) :	3,503	N
Puissance mécanique (Pshaft) :	73,43	W
Puissance électrique (Pelec) :	73,43	W
Rendement hélice (Eta_prop) :	0,7156	-
Rendement global (Eta_all) :	0,7156	-
Régime moteur (RPM) :	5800	tr/min
Couple moteur (Torque) :	0,1209	N.m

RESULT

Criteria	73,43	Min	*Minimiser la puissance électrique Pel*

Constraints

3,503	>=	3,5	*Poussée T >= 3.5 N (palier vol)*
0,7156	>=	0,5	*Rendement hélice >= 50%*

Penalty	Factor:	1000000000
Objective	-73,43	

Feuille de calcul Microsoft Excel

4. Second Exemple Industriel : Optimisation d'une Aile d'Avion par Couplage Étagé XFOIL – AVL

4.1 Problématique Aérodynamique et Mécanique du Vol

L'étude traite de la conception optimale de la voilure d'un drone tactique de reconnaissance évoluant en vol de croisière à V = 30 m/s au niveau de la mer (rho = 1,225 kg/m3). La masse totale en vol est de M = 4,0 kg (soit un poids sustenté P = 39,24 N) et l'envergure est fixée par gabarit d'emport à b = 1,80 m.

Ce problème présente une architecture MDO particulièrement avancée :

- **1. Couplage multi-code hétérogène :** Le calcul aérodynamique associe en cascade XFOIL 6.99 (solveur eulérien 2D couplé à une couche limite intégrale visqueuse pour la génération des polaires des profils) et AVL 3.35 (méthode de réseau de tourbillons Vortex Lattice 3D pour la portance, la traînée induite et l'équilibre longitudinal).
- **2. Espace de recherche mixte (Discret / Continu) :** Le vecteur de décision X associe des variables discrètes (sélection d'indices de profils dans un catalogue de 12 géométries réelles) et des variables continues régissant le plan de forme 3D (allongement, effilement, vrillage, flèche, dièdre).

Formulation mathématique de l'optimisation de la voilure

```
Minimiser :       f(X) = CD_tot(X)    [-] (Coefficient de traînée totale de l'aile)
Sous contraintes : C1(X) : Cma(X) <= -0,05    (Marge statique de stabilité longitudinale)
                   C2(X) : CL_tot(X) >= CL_requis = (2*M*g) / (rho*S*V^2) (Équilibre de sustentation)
```

Table DATA : Déclaration des 7 variables mixtes

Paramètre	Type	Min	Max	Optimum	Rôle physique et mécanique du vol
Profil_racine	Integer	1	12	1	Index du profil d'emplanture (sélection parmi 12 profils de référence)
Profil_saumon	Integer	1	12	11	Index du profil de saumon (profil aminci pour l'extrémité de l'aile)
Aspect_Ratio	Real	10,0	20,0	10,01	Allongement de l'aile (Lambda = b^2 / S, arbitrant traînée induite et surface)
Taper_Ratio	Real	0,10	1,00	0,662	Effilement (lambda = c_saumon / c_racine, optimisant la charge de portance)
Twist	Real	-10,0 °	0,0 °	-1,52 °	Vrillage géométrique d'extrémité (washout prévenant le décrochage marginal)
Sweep	Real	0,0 °	30,0 °	28,29 °	Angle de flèche au bord d'attaque (recul du foyer aéro pour la stabilité statique)
Dihedral	Real	0,0 °	10,0 °	6,88 °	Angle de dièdre (stabilité latérale spirale et rappel en roulis Cl_beta < 0)

Catalogue des 12 profils intégrés (Feuille Profils) : Profil 1 = N+3 A1 (visc. decam.) ; Profils 2 à 5 = Famille Drela AG35, AG36, AG37, AG38 ; Profils 6 à 9 = Famille AG40d, AG41d, AG42d, AG43d ; Profils 10 à 12 = Famille AG45c, AG46c, AG47c.

4.2 Architecture du Couplage Multi-Solveurs (Colonnes A à R)

La feuille Model déploie une chaîne séquentielle de 18 colonnes d'actions orchestrant la cascade d'échanges :

Colonnes	Action	Cible / Fichier	Opération réalisée dans le flux
A	Calculation	All	Calcul préliminaire de la surface alaire S = b^2 / Aspect_Ratio et mise à jour des géométries.

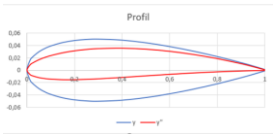
B à F	Delete / Write / LaunchScript / Read	XFOIL Racine (Commands.bat / profil_racine.dat / polaire.txt)	Génération du profil d'emplanture via OFFSET, lancement de XFOIL à Re = 10^6, balayage alpha in [-5°, 20°] et lecture de la polaire.
G à K	Delete / Write / LaunchScript / Read	XFOIL Saumon (Commands.bat / profil_saumon.dat / polaire.txt)	Génération du profil de saumon via OFFSET, calcul XFOIL 2D de la polaire visqueuse à Re = 10^6 et lecture en colonne K.
L	Calculation	All	Régression matricielle Excel (colonnes U à Z) : identification automatique des 3 points polaires (Cl_min, Cl(Cd_min), Cl_max) et fit parabolique CD(CL) = CD1 + CD2*CL + CD3*CL^2.
M	Write	pathFolder\Wing.avl	Génération du modèle 3D AVL (discrétisation vortex, positionnement des sections emplanture/saumon avec flèche, dièdre, vrillage et traînée CDCL).
N	Write	pathFolder\Wing.mass	Écriture de la fiche d'inertie et masse (M = 4,0 kg, position du centre de gravité Xcg = 0,235 m).
O	Write	pathFolder\commands.txt	Script AVL : chargement des fichiers, consigne de portance CL = CL_requis, calcul d'équilibre et écriture du rapport results.st.
P	LaunchScript	cmd.exe /c avl.exe < commands.txt	Exécution bloquante d'AVL (Vortex Lattice Method) sous redirection stdin.
Q	Read	pathFolder\results.st	Ingestion du rapport de forces et moments aérodynamiques 3D en colonne Q.
R	Calculation	All	Extraction textuelle des résultats (Alpha en Q18, CLtot en Q26, CDtot en Q27, Cma en Q42) et calcul de la fonction Objective pénalisée.

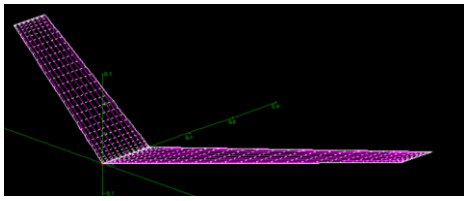
4.3 Analyse des Résultats d'Optimisation de l'Aile

Grandeur de Conception	Valeur Initiale	Optimum Cab Designer	Rôle Physique & Interprétation Aérodynamique
Profil Emplanture	Profil 1 (N+3 A1)	Profil 1 (N+3 A1)	Épaisseur modérée, forte capacité d'emport en portance et laminarité étendue.

Profil Saumon	Profil 6 (AG40d)	Profil 11 (AG46c)	Profil ultra-fin minimisant la traînée de culot et préservant le décrochage marginal.
Allongement (AR)	15,0	10,01	Compromis optimal entre réduction de traînée induite et surface portante requise.
Effilement (TR)	0,55	0,662	Approche la distribution elliptique idéale de portance de Prandtl (c(y) ~ sqrt(1-(2y/b)^2)).
Vrillage (Twist)	-5,0 °	-1,52 °	Washout modéré prévenant le décrochage des saumons sans dégrader la portance totale.
Flèche (Sweep)	15,0 °	28,29 °	Recul du foyer aérodynamique derrière le CG (Xcg = 0,235 m) pour garantir la stabilité.
Dièdre (Dihedral)	5,0 °	6,88 °	Assure la stabilité latérale spirale et le rappel automatique en roulis.
Portance totale (CL)	Non asservie	0,2199	Respect strict de la sustentation du palier (CL >= CL_requis = 0,2198).
Marge de tangage (Cma)	+0,05 (instable)	-0,919	Stabilité statique longitudinale démontrée (Cma <= -0,05 respectée avec marge).
Traînée totale (CD)	> 0,0150	0,00684 (68,4 pts)	Traînée minimale absolue combinant traînée de profil XFOIL et traînée induite AVL.

Xfoil + AVL (Massachusetts Institute of Technology)





Chemin d'accès de Xfoil :	C:\Xfoil
Chemin d'accès de AVL :	C:\AVL
Chemin d'accès du projet :	C:\AVL\Project1

DATA	1	2	4	5	6	7	8
Name	Profil_racine	Profil_saumon	Aspect_Ratio	Taper_Ratio	Twist	Sweep	Dihedral
Type	Integer	Integer	Real	Real	Real	Real	Real
Min / k	1	1	10	0,1	-10	0	0
Max / n	12	12	20	1	0	30	10
Init / End	1	11,01	10,00767072	0,66150367	-1,517846408	28,2900238	6,8836689

Mach :	0	
Viscosité :	1,00E+06	Pa s
Gravité :	9.81	
Masse volumique :	1,225	kg/m^3
Masse :	4	kg
Vitesse :	30	m/s
Envergure :	1,8	m

Profil racine :	1	
Profil saumon :	11,01	
Allongement (Aspect Ratio) :	10,00767072	
Effilement (Taper Ratio) :	0,66150367	
Vrillage (Twist/Washout) :	-1,517846408	°
Flèche (Sweep) :	28,2900238	°
Dièdre (Dihedral) :	6,8836689	°

RESULT

Criteria 0,006840004 Min — *CD min*

Constraints

-0,05 >= -0,91918 — *CMA* ≤ -0,05

0,21987 >= 0,21987 — CL ≥ 2* g* Masse/(ρ* Vitesse^2* Surface)

Penalty Factor: 1,00E+09

Objective -0,006840004

Surface :	0,323751659	m^2
Incidence :	3,35165	°
CL :	0,21987	
CD :	0,00684	
CMA :	-0,91918	

Feuille de calcul Microsoft Excel

5. Troisième Exemple Industriel : Optimisation Stochastique d'une Constellation Satellitaire sous GRIF / Moca-RP

5.1 Problématique Industrielle et Contexte Spatial

Le troisième cas d'application est issu d'un projet CNES / TotalEnergies modélisé dans le classeur Constellation de satellites 5.xlsx. Il concerne le déploiement et le maintien en condition opérationnelle d'une constellation de satellites de télécommunication et d'observation répartis sur 6 plans orbitaux pendant une durée de mission de 15 ans (soit 131 400 heures).

La constellation subit des défaillances aléatoires de composants de bord (régies par des lois exponentielles et de Weibull) et des dégradations spatiales progressives. Pour garantir la continuité de service, l'opérateur doit définir une stratégie optimale de réapprovisionnement combinant des lancements lourds (Ariane) et des lancements d'urgence légers (Vega), adossés à une politique de stockage préventif de satellites de réserve en orbite (spares) :

- **Délai de lancement Ariane :** 1 464 heures (~ 2 mois) ; capacité d'emport élevée mais coût unitaire important.
- **Délai de lancement Vega :** 2 196 heures (~ 3 mois) ; capacité d'emport réduite mais grande réactivité pour boucher un trou orbital.
- **Délai de mise en stock orbite :** 1 464 heures entre l'injection orbitale et le phasage effectif dans le plan opérationnel.
- **Phase initiale de déploiement :** 8 819 heures (~ 1 an) consacrées à la mise en place de la constellation nominale.

- **Durée de mission utile :** T_utile = 131 400 - 8 819 = 122 581 heures.

Le solveur utilisé est GRIF / Moca-RP (TotalEnergies), moteur haute performance d'évaluation de Réseaux de Petri Stochastiques par simulation de Monte-Carlo. Pour chaque individu testé, Moca-RP simule 10 000 histoires de vie stochastiques complètes afin de délivrer la distribution statistique du temps de disponibilité opérationnelle et du coût total du programme.

5.2 Formulation Mathématique de l'Optimisation Stochastique sous Risque

Contrairement aux cas déterministes d'aérodynamique pure, les grandeurs de sortie issues de GRIF/Moca-RP sont des variables aléatoires décrites par une moyenne empirique (E) et un écart-type (sd). L'objectif est formulé sous forme de quantile statistique de service sous contrainte de risque budgétaire :

```
Maximiser :       Critere(X) = Q_60%(Temps_disponible) / (Duree_mission - Temps_deploiement)
                             = NORM.INV(0,60 ; Temps_disponible_value, Temps_disponible_sd) / 122 581
h
Sous contrainte : 5 000 M€ >= Q_50%(Cout) = NORM.INV(0,50 ; Cout_value, Cout_sd)
```

Table DATA : Déclaration des 4 variables de stratégie spatiale

Paramètre	Type	Min	Max	Optimum	Rôle dans la stratégie de déploiement spatial
Type_satellite	Integer	1	2	1	Technologie satellite (1 = standard 24/5 sat max ; 2 = durci haute fiabilité 32/7 sat max)
Emport_Ariane	Real	22	32	25	Nombre nominal de satellites injectés simultanément lors d'un tir lourd Ariane
Emport_Vega	Real	1	7	5	Nombre de satellites injectés lors d'un tir de réapprovisionnement rapide Vega
Seuil_stock_orbite	Real	0	1000	1	Seuil de déclenchement du réapprovisionnement en satellites de réserve en orbite (spares)

5.3 Architecture du Couplage Externe sous Constellation de satellites 5.xlsx

Le classeur active les deux drapeaux de contrôle simultanément : External_Application = 1 et Optimisation_Simulation_Coupling = 1. Les colonnes d'interfaçage de Feuil1 orchestrent les échanges suivants :

Col.	Action	Cible / Fichier	Description du flux d'échanges
A	Calculation	All	Calcul préliminaire des arrondis et bornements d'emports selon le type de satellite (Q16:Q18).

B	Write	ChangeParams.csv	Génération du fichier CSV délimité par des points-virgules transmettant les 6 paramètres de vol (délais, emports Ariane/Vega, seuils).
C	Write	ChangeParams.Launch.bat	Génération du script batch appelant la machine virtuelle Java (JVM) avec options mémoire et exécution du jar Petri12.jar sur le réseau Constellation_final.jpp.
D	LaunchWait	ChangeParams.Launch.bat	Exécution bloquante du solveur Monte-Carlo (10 000 histoires). Excel attend la fin de l'écriture du rapport XML.
E	Read	ChangeParams.Result.xml	Ingestion directe du rapport XML hiérarchique de 1 956 lignes dans la colonne E.
F	Calculation	All	Recalcul Excel : extraction par chaînes de texte des estimateurs empiriques de Moca-RP et calcul de l'Objective pénalisée.

Script de lancement de la JVM (Col. C) et extraction XML (Col. F)

Le script batch invoque la machine virtuelle Java avec 4 Go de mémoire allouée et la bibliothèque native Moca14 :

```
set PATH=%~dp0\..\..\Bin\Lib;%PATH%
set WORKDIR=%~dp0
cd /D %~dp0\..\..\Bin\Petri12
set JVMOPTIONS=-ms128m -mx4G -Xmixed -Djava.library.path="../Tools/Moca14;../Lib" -
Dsun.java2d.d3d=false -Dconsole=true
..\Java\bin\java %JVMOPTIONS% -jar Petri12.jar %WORKDIR%/Constellation_final.jpp -databasecsv
%WORKDIR%/ChangeParams.csv -opt Moca.NbrHistory=10000 -compute -type xml -o
%WORKDIR%/ChangeParams.Result.xml -exit
```

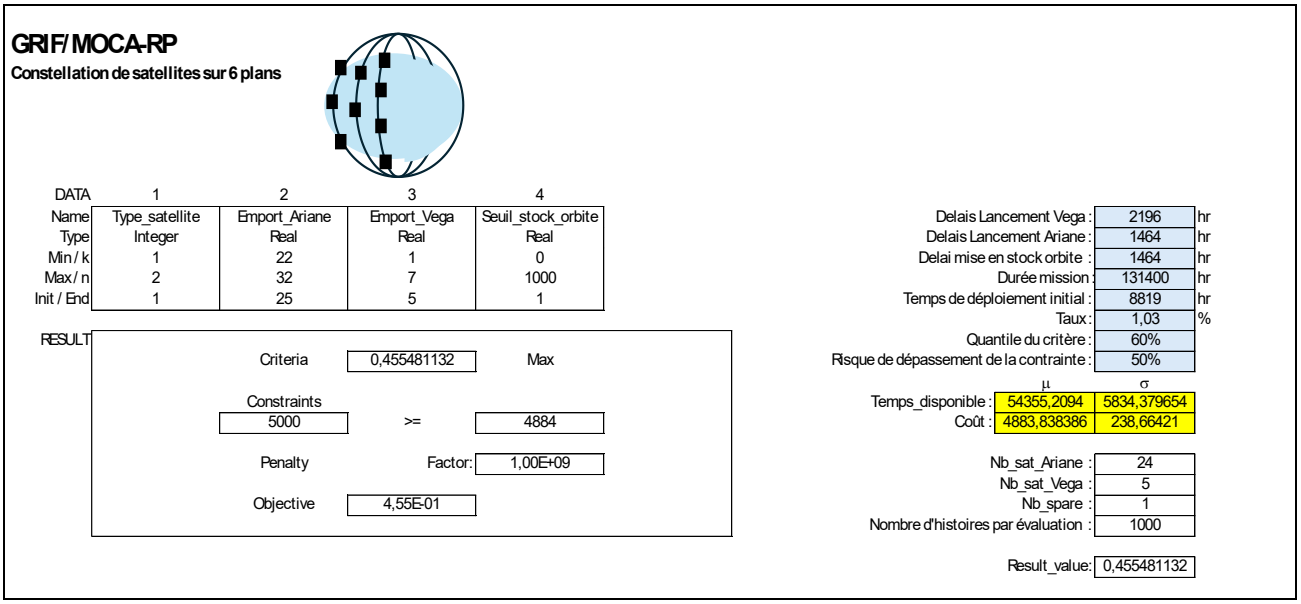
Dépouillement des résultats XML (Cellules P13, Q13, P14, Q14) :

- **Temps disponible (ligne E12) :** value = 5,35575E+04 h (moyenne) ; sd = 6,50319E+03 h (écart-type).
- **Coût total du programme (ligne E19) :** value = 4,90590E+03 M€ (moyenne) ; sd = 2,33168E+02 M€ (écart-type).
- **Critère calculé (K11) :** Disponibilité au quantile 60 % = NORM.INV(0,60 ; 53557,54 ; 6503,19) / 122 581 h = 45,04 % (Result_value = 0,450356).
- **Contrainte budgétaire (L14) :** Coût au risque 50 % (médiane) = 4 905,90 M€ <= 5 000 M€ (Contrainte budgétaire strictement respectée).

5.4 Matrice Comparative des Trois Architectures de Couplage

Caractéristique	Exemple 1 : Hélice (Qprop)	Exemple 2 : Aile (XFOIL – AVL)	Exemple 3 : Constellation (GRIF)

Physique modélisée	Aérodynamique & BEM propulsif	Aérodynamique visqueuse & Stabilité	Sûreté de fonctionnement & Disponibilité
Variables de décision	6 continues réelles (cordes, vrillages)	Mixtes (2 profils discrets + 5 réelles 3D)	Mixtes (1 entier + 3 réels de stratégie)
Nombre de solveurs	1 exécutable CLI (qprop.exe)	2 solveurs en cascade (xfoil puis avl)	1 moteur JVM + C++ (Petri12.jar / Moca-RP)
Fichiers d'échange	Fichiers colonnes ASCII (.dat)	Fichiers polaires (.txt) et géométrie (.avl)	Fichier CSV structuré et sortie XML
Type de calcul	Déterministe ultra-rapide (~ 10 ms)	Déterministe étagé (~ 1,5 s)	Stochastique Monte-Carlo (10 000 tirages, ~ 5 s)
Formulation Objectif	Minimisation scalaire (P_shaft)	Minimisation de traînée sous Cma <= -0,05	Maximisation de quantile sous risque budgétaire



Feuille de calcul Microsoft Excel

6. Synthèse des Recommandations pour l'Ingénieur d'Études

L'expérience acquise sur ces trois cas industriels permet de dégager 4 règles d'or pour concevoir des chaînes de couplage robustes et infaillibles sous Cab Designer :

Règle n°1 : Typage rigoureux des variables discrètes dans la table DATA

Toute variable représentant un choix de catalogue ou une option discrète (index de profil aérodynamique, type de satellite, matériau, nombre entier de pales ou d'étages) doit impérativement être déclarée en type Integer, Binary ou Alphanumeric dans la table DATA. Si une telle variable est déclarée par mégarde en type Real, l'algorithme génétique lui assignera des valeurs décimales continues (ex. profil 11,01), et le simplexe de Nelder-Mead tentera d'évaluer des dérivées locales sans signification physique.

Règle n°2 : Double tampon et purge préventive systématique (Action Delete)

Il est primordial d'intercaler une action Delete immédiatement avant chaque action LaunchWait ou LaunchScript pour détruire le fichier de résultats produit lors de l'itération précédente. En cas de plantage du solveur externe (problème d'arguments, non-convergence géométrique, dépassement mémoire), le fichier cible est physiquement absent, ce qui interdit au mécanisme Read de relire par erreur les résultats de l'individu précédent.

Règle n°3 : Encapsulation systématique des séparateurs décimaux (=SUBSTITUTE)

Sur les postes de travail Windows configurés en paramètres régionaux français, Excel écrit par défaut les nombres réels avec une virgule (ex. 15,0). Or la quasi-totalité des solveurs scientifiques (compilés en Fortran, C++, Java ou Python) exigent le point décimal strict (15.0). Lors de la composition des fichiers de commandes ou des tables géométriques sous l'action Write, toutes les grandeurs numériques doivent impérativement être encapsulées dans la fonction Excel :

```
=SUBSTITUTE(Valeur_Numerique, ",", ".")
```

Règle n°4 : Protection contre les plantages par initialisation pénalisée

Dans les scripts batch d'exécution, il convient d'écrire en amont de l'extraction des valeurs par défaut aberrantes et pénalisantes (ex. traînée CD = 999,0, poussée T = 0,0, temps disponible = 0,0). Si le solveur échoue ou n'émet aucune ligne de vol, le fichier results.txt conserve ces valeurs d'initialisation : la cellule Excel correspondante lit un nombre décimal valide (évitant l'erreur bloquante #VALEUR!), la contrainte est violée de manière flagrante, et Cab Designer applique la pénalité extérieure de 10^9 pour rejeter immédiatement le candidat sans interrompre l'optimisation.

7. Références et Classeurs Modèles Intégrés

Les trois classeurs d'optimisation opérationnels sont documentés et structurés conformément aux standards de Cab Designer Version 3 :

- **1. Helice_QPROP_Fonctionnel.xlsx :** Couplage aéro-propulsif BEM sous Qprop v1.22. Optimisation des lois de corde et de vrillage d'une hélice bipale en composite sous contraintes de poussée (T >= 3,5 N) et de rendement.
- **2. Aile d'avion AVL XFOIL.xlsx :** Couplage aéro-structurel étagé XFOIL 6.99 (polaires visqueuses 2D) et AVL 3.35 (Vortex Lattice 3D). Optimisation conjointe des profils discrets et de la géométrie alaire sous contraintes de portance et de stabilité longitudinale (Cma <= -0,05).

- **3. Constellation de satellites 5.xlsx :** Couplage stochastique sous Réseaux de Petri (GRIF / Moca-RP). Optimisation d'une stratégie de lancement spatial (Ariane / Vega / spares) pour maximiser la disponibilité opérationnelle sur 15 ans sous contrainte budgétaire.