Livre Blanc d'Architecture Logicielle & Ingénierie MDO

Cab Designer v3 : Plateforme Intégrée d'Optimisation Hybride, Simulation Stochastique et Sûreté de Fonctionnement sous Tableur

DOCUMENT DE SYNTHÈSE INDUSTRIELLE : Édité par SARL CAB INNOVATION | Auteur : Direction Scientifique & Ingénierie Système | Date : Novembre 2026 | Diffusion : Décideurs Techniques, Architectes Système & Responsables R&D / Fiabilité.

1. Synthèse Exécutive et Rupture Méthodologique

Dans l'ingénierie moderne des systèmes complexes (aéronautique, spatial, défense, énergie), la phase amont de conception impose un arbitrage perpétuel entre deux mondes logiciels étanches. D'une part, les tableurs industriels (Microsoft Excel®) centralisent plus de 90 % des données d'études préliminaires, bilans de masse, arbres de coûts de cycle de vie (LCC) et architectures système grâce à leur souplesse d'utilisation universelle. D'autre part, les progiciels dédiés d'optimisation multidisciplinaire (MDO) et de simulation physique imposent des environnements fermés, des formats de données propriétaires, des coûts de licence prohibitifs et une complexité de déploiement qui freinent l'agilité des équipes d'études.

Cab Designer Version 3 a été conçu pour éliminer cette fracture logicielle sans concession sur la puissance algorithmique. En s'implantant directement au cœur de l'environnement Microsoft Excel® via un ruban dédié et des moteurs de calcul compilés natifs multicoeurs, la suite transforme le classeur standard en une plateforme industrielle de calcul de haute fidélité. Elle unifie nativement l'optimisation non linéaire sous contraintes, la simulation probabiliste accélérée, le pilotage de solveurs externes et l'évaluation de la sûreté de fonctionnement (SdF).

2. Architecture Globale de la Plateforme Cab Designer v3

L'architecture de Cab Designer v3 s'articule autour de quatre couches coordonnées, garantissant une étanchéité parfaite entre l'orchestration des données, les algorithmes mathématiques et les codes métier physiques :

• Couche I — Orchestration et IHM (Excel Add-In .xlam) : Le classeur assure le rôle de chef d'orchestre paramétrique. Les variables de décision, les contraintes et les estimateurs sont déclarés dans des tables normées (DATA, RESULT, RANDOM, SIMULATION_RESULTS). L'ingénieur conserve un contrôle visuel direct sur chaque formule et liaison du modèle.

• Couche II — Moteur d'Optimisation Hybride (AG + Nelder-Mead) : Résolution conjointe d'espaces de conception continus et discrets, combinant exploration globale stochastique et raffinement local déterministe.

• Couche III — Moteur Stochastique & Allocation Adaptative : Moteur de Monte-Carlo multithreadé réduisant les temps d'évaluation d'un facteur 15 à 60 par filtrage statistique précoce des configurations dominées.

• Couche IV — Passerelle Universelle CLI/ASCII & Écosystème SdF : Interfaçage étanche avec des codes externes (XFOIL, AVL, Qprop, GRIF/Moca-RP) et suite modulaire d'analyse de sûreté (New Cabtree, New Supercab, Petricab, Cab Model).

3. Moteur d'Optimisation Hybride et Formulation Mathématique

3.1 Formulation générale du problème d'optimisation

Le solveur traite les problèmes non linéaires, non convexes et potentiellement multimodaux sous la forme canonique :

min f(X) ou max f(X) sous les contraintes C_j(X) >= S_j, j in {1, ..., m}

où X = (x_1, x_2, ..., x_p) représente le vecteur de décision dimensionné dans la table DATA. La fonction globale d'évaluation pénalisée Phi(X), synthétisée dans la cellule Objective, intègre les violations selon deux formulations paramétrables :

3.2 Traitement des contraintes : Pénalité extérieure vs Barrière logarithmique

Méthode	Formulation Mathématique	Comportement Algorithmique	Domaine Privilégié
Pénalité extérieure (Penalty)	Phi(X) = s·f(X) - K · (k/N_iter) · sum[max(0, S_j - C_j(X))]	Autorise l'exploration transitoire du domaine infaisable. La sévérité de pénalisation augmente au fil des générations k.	Surfaces de réponse fortement contraintes, démarrages hors bornes, optimums situés sur la frontière.
Barrière intérieure (Barrier)	Phi(X) = s·f(X) + K · sum[ln(C_j(X) - S_j)] si admissible, sinon -10^9	Maintient strictement les individus à l'intérieur du domaine admissible en tendant vers l'infini au voisinage des frontières.	Modèles physiques interdisant mathématiquement le franchissement (ex. divergence CFD, racines négatives).

3.3 Mécanisme de couplage hybride AG – Simplexe

Les fonctions de performance réelles issues de codes métier ou de bilans système sont fréquemment bruitées et non différentiables, ce qui disqualifie les algorithmes traditionnels à base de gradient (SQP, BFGS). Pour pallier cette faiblesse :

1. L'Algorithme Génétique (AG) opère une dispersion stochastique sur l'ensemble de l'espace admissible, échappant aux minima locaux et identifiant le bassin d'attraction global.

2. Le Simplexe de Nelder-Mead est déclenché périodiquement sur les meilleurs individus de la population (variables continues uniquement). Il assure un raffinement géométrique rapide sans évaluation de dérivées partielles.

3. Analyse de Vraisemblance & Matrice de Fisher : Lors de recalages paramétriques (ex. dégradation de Wiener), l'option Fisher inverse la matrice d'information pour délivrer les intervalles de confiance asymptotiques (méthode de Wald).

3.4 Typage exhaustif des variables de décision

Contrairement aux solveurs généralistes qui forcent l'approximation continue, Cab Designer prend en charge nativement 8 typologies fondamentales de variables (sélectionnables par menu déroulant dans la table DATA) :

Type de Variable	Description et Paramétrage	Application Métier Typique
Real	Réel continu borné entre Min et Max	Corde, calage, envergure, masse, pression, température
Integer	Entier discret borné entre Min et Max	Nombre de pales, nombre d'étages, nombre de satellites
Binary	Valeur binaire stricte (0 ou 1)	Activation/désactivation de redondance, vanne fermée/ouverte
Alphanumeric	Sélection d'une référence parmi k clés textuelles	Sélection dans un catalogue (profil aéro, type de moteur, alliage)
Permutation	Ordre séquentiel des entiers de 1 à k	Ordonnancement de chaîne de production, routing logistique
Combination	Tirage non ordonné de k éléments parmi n sans remise	Choix d'un sous-ensemble d'instruments embarqués
Repetition	Tirage de k éléments parmi n avec répétition autorisée	Affectation de ressources génériques à des postes de charge
Arrangement	Tirage ordonné de k éléments parmi n sans remise	Séquençage prioritaire sous contraintes d'allocation

4. Simulation de Monte-Carlo & Algorithme à Allocation Adaptative

4.1 Inversion stochastique et bibliothèque de lois

Le moteur stochastique propage les incertitudes d'entrée X ~ F_X au travers du modèle Excel pour construire la densité de probabilité des grandeurs de sortie Y. L'échantillonnage s'effectue par inversion directe de fonction de répartition : X_i = F^-1(U), avec U ~ U[0, 1[. Vingt lois continues et discrètes sont intégrées : Uniforme, Normale, Normale standard, Log-normale, Exponentielle, Weibull, Gumbel, Gamma, Bêta, Erlang, Chi-deux, Triangulaire, Pareto, Binomiale, Géométrique, Hypergéométrique, Poisson.

4.2 Rupture de performance : Tri adaptatif à deux niveaux

Dans une boucle d'optimisation robuste, évaluer chaque candidat avec N = 10 000 tirages est prohibitif (100 individus x 20 générations = 20 millions d'évaluations). Cab Designer implémente un algorithme de filtrage adaptatif breveté :

• Phase 1 — Évaluation grossière préliminaire : Chaque candidat n'est d'abord simulé que sur un nombre restreint de tirages (ex. N_min = 50).

• Phase 2 — Filtrage et rejet sous risque statistique : En comparant les moyennes et variances empiriques selon un niveau de risque paramétrable (Niveaux 1, 2 ou 3), les configurations dominées sont rejetées sans calcul additionnel.

• Phase 3 — Raffinement ciblé : Seules les solutions en compétition réelle pour l'optimum sont raffinées jusqu'au plafond maximal N_max (ex. 10 000 à 100 000 tirages).

Résultat industriel : Cette approche divise le temps d'exécution global d'un facteur 15 à 60 tout en garantissant mathématiquement l'identification de la solution optimale.

5. Passerelle d'Interfaçage Externe (CLI/ASCII)

Lorsque la physique du problème requiert un solveur spécifique non programmable sous Excel, la passerelle d'interfaçage délègue le calcul à des exécutables autonomes via un protocole séquentiel découpé en colonnes d'actions (activé par la variable External_Application = 1) :

Primitive d'Action	Paramètre Ligne 2	Mécanisme Bas Niveau et Rôle Fonctionnel
Calculation	All (ou vide)	Force le recalcul intégral du classeur (CalculateFull) pour actualiser la géométrie.
Delete	Chemin complet fichier	Supprime préventivement le fichier de résultats de l'itération précédente pour interdire tout faux positif.
Write	Chemin complet fichier	Génère dynamiquement sur disque le fichier d'entrée ASCII ou le script batch (.bat).
LaunchWait	Commande CLI complète	Exécute le solveur en tâche de fond et suspend Excel jusqu'à la fin du calcul (ExitCode = 0).
Read	Chemin complet fichier	Ouvre le fichier produit par le solveur et parse ses grandeurs dans les cellules cibles.
Launch / Wait	Commande CLI / Durée (s)	Mode asynchrone non bloquant avec temporisation calibrée si nécessaire.

5.2 Principes de robustesse industrielle

L'interfaçage externe respecte trois règles d'étanchéité industrielle : (1) Encapsulation décimale systématique via la fonction =SUBSTITUTE(valeur, ",", ".") pour adapter les formats français d'Excel aux parseurs Fortran/C++/Java ; (2) Purge préventive (Delete) interdisant la réutilisation de sorties antérieures en cas de

crash du solveur ; (3) Initialisation pénalisée dans les scripts batch assurant l'injection automatique d'une pénalité de 10^9 pour rejeter le candidat sans interrompre l'optimisation.

6. Écosystème Modulaire en Sûreté de Fonctionnement (SdF)

Cab Designer v3 intègre nativement la sûreté de fonctionnement au cœur du compromis d'architecture grâce à sa suite de modules interconnectés :

Module SdF	Formalisme Mathématique	Grandeurs Injectables dans l'Optimisation
New Cabtree v1	Arbres de défaillances (Fault Trees) et calcul des coupes minimales normées	Probabilité d'événement redouté P_top(t), facteurs d'importance de Birnbaum / RAW / RRW.
New Supercab v1	Processus markoviens continus/discrets et évaluation d'architectures	Disponibilité asymptotique A_inf, MTTF, MTTR, taux de défaillance équivalent système.
Petricab v1	Réseaux de Petri stochastiques multicoeurs à transitions temporisées	Disponibilité opérationnelle avec dépendances complexes, politiques de maintenance et stocks.
Cab Model v1	Modèles de dégradation physique, processus de Wiener/Gamma & Réseaux de neurones	Prédiction de durée de vie résiduelle (RUL), recalage bayésien par maximum de vraisemblance.

7. Validation Industrielle et Benchmarks Comparatifs

La robustesse de la suite a été validée sur des cas d'ingénierie représentatifs des défis aérospatiaux actuels :

Cas d'Étude	Outils Métier Couplés	Espace de Recherche	Gains Industriels & Physiques Obtenus
Voilure de drone tactique	XFOIL 6.99 (visqueux 2D) + AVL 3.35 (VLM 3D)	7 variables mixtes (2 profils de catalogue + 5 paramètres 3D)	Traînée minimale absolue (CD = 0,00684) avec respect strict de la portance et stabilité longitudinale garantie (Cma = -0,919).
Hélice propulsive BEM	Qprop v1.22 (MIT)	6 variables réelles continues (corde et calage B-Splines)	Gain propulsif de +10,36 points de rendement à poussée imposée (3,5 N) ; réduction de traînée induite au saumon.
Constellation spatiale (15 ans)	GRIF / Moca-RP (TotalEnergies) 10 000 tirages Monte-Carlo	4 variables mixtes de stratégie orbitale et de réapprovisionnement	Disponibilité opérationnelle de 45,04 % au quantile 60 % sous plafond budgétaire strict (<= 5 000 M€).

8. Modalités de Déploiement et Accompagnement

Cab Designer Version 3 est distribué sous forme de complément sécurisé (.xlam) pour Microsoft Excel® (Windows 10/11 64 bits, Excel 2016 à Microsoft 365). L'installation ne requiert aucune modification de l'infrastructure informatique de l'entreprise ni droits d'administration étendus. Les classeurs de démonstration et modèles d'interfaçage sont fournis pré-paramétrés.

La SARL CAB INNOVATION assure le support technique d'ingénierie, la formation des équipes de conception et l'accompagnement au couplage de vos codes métier spécifiques.

> **CONTACT & DEMANDE DE DÉMONSTRATION :** SARL CAB INNOVATION | Contact & Relations Techniques : contact@cab-innovation.fr | Web : www.cab-innovation.fr | Toulouse, France.