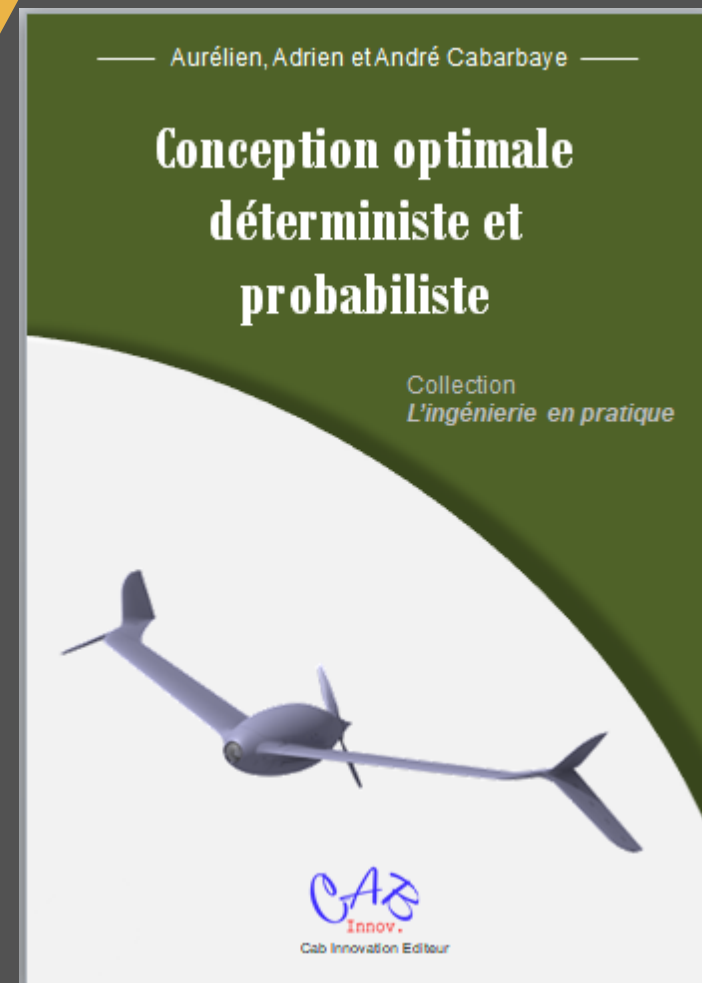


Conception optimale :

Parfaire la réponse au besoin en décroisonnant les métiers

André Cabarbaye
24 juin 2022
Journée COMET CNES



Introduction

Il est nécessaire de concilier les besoins de la Sûreté de Fonctionnement (SdF) et du Soutien Logistique Intégré (SLI) :

- la disponibilité intrinsèque (avec stock de rechanges infini) n'a pas beaucoup de sens pour un client qui ne s'intéresse qu'à la disponibilité opérationnelle et au coût d'usage de son produit pour un certain niveau de performances,
- ces caractéristiques doivent dorénavant intégrer le Health Monitoring et la maintenance prédictive dont l'impact est souvent considérable.

Mais le cloisonnement des métiers ne se limite pas au domaine de la fiabilité et nuit gravement à l'optimisation des systèmes.

Ainsi, l'optimisation de la conception est loin d'être atteinte dans les bureaux d'études où la première solution trouvée est généralement celle qui est finalement retenue après quelques ajustements.



Introduction

L'optimisation n'est pas l'apanage des mathématiciens de haut vol.

Elle doit être effectuée par les concepteurs, eux-mêmes, s'ils veulent :

- répondre au juste besoin et aux exigences environnementales et sociétales, en termes de réduction de déchets, ressources consommées, efficacité énergétique...,
- assurer la pérennité de leur activité face à la concurrence.

Cette communication montre les enjeux de la conception optimale à travers des cas d'application et cherche à en vulgariser les fondements théoriques.

Elle s'appuie sur un nouvel ouvrage des éditions Cab Innovation qu'elle présente avant publication.

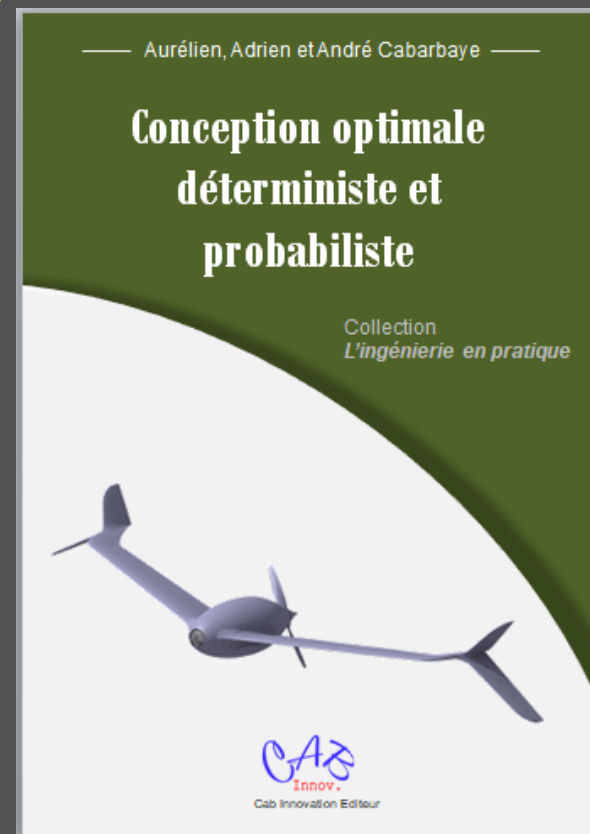


Plan de l'intervention

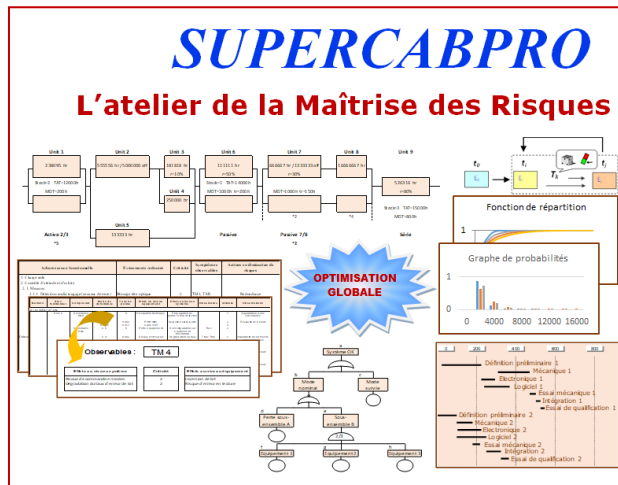
- ✓ Introduction
- ✓ Le contexte (Cab innovation et son activité d'édition)
- ✓ Conception optimale
- ✓ Dimensionnement déterministe / probabiliste
- ✓ Conclusion



Cab innovation et son activité d'édition



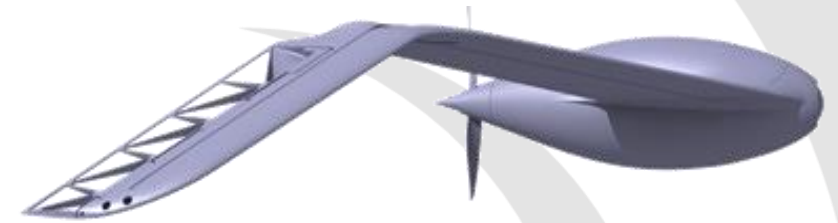
L'entreprise Cab Innovation



Développement
d'outils logiciels



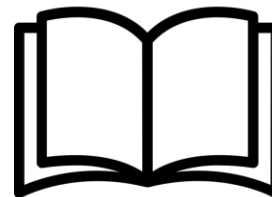
R&D de
prototypes
innovants



Etudes
d'ingénierie



Formation



Edition d'ouvrages
scientifiques et
techniques

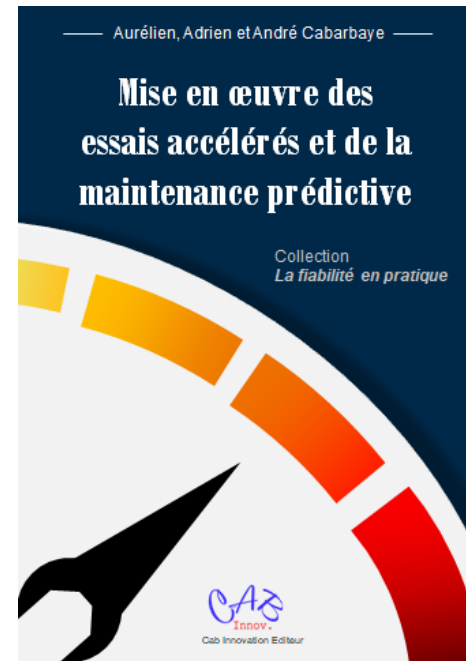


L'activité d'édition chez Cab Innovation

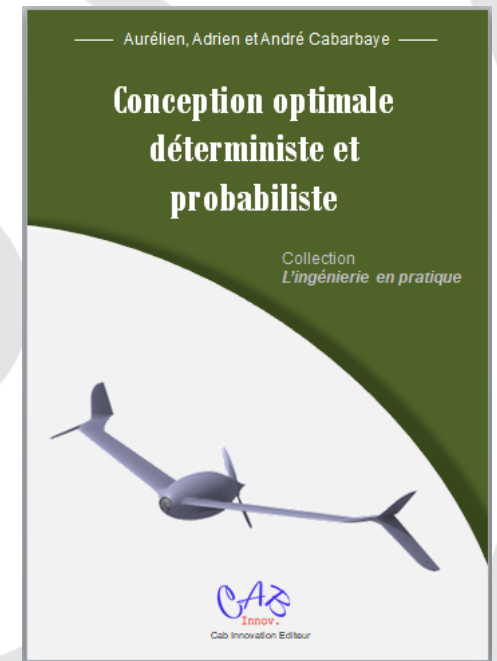
L'ingénierie en pratique



ISBN : 979-10-97287-12-2



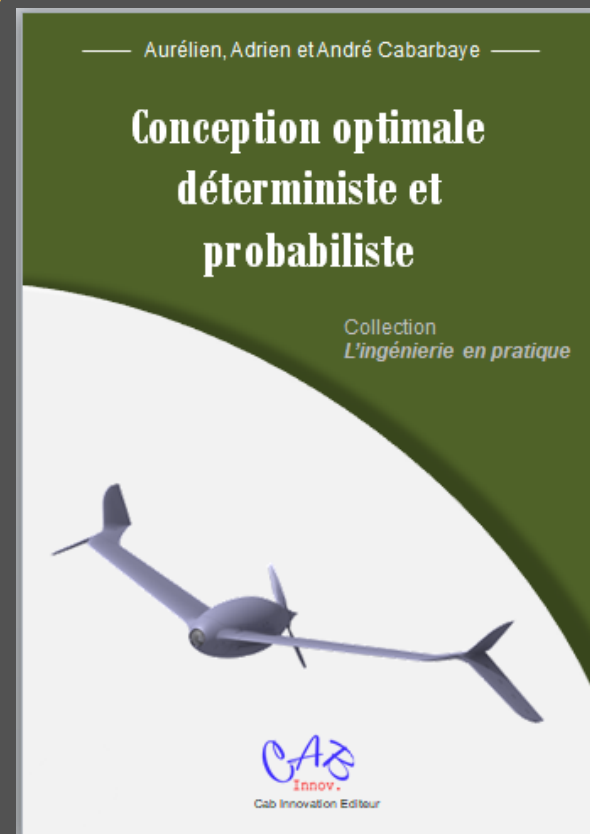
ISBN : 979-10-97287-13-9



ISBN : 979-10-97287-14-6

Boutique en ligne : <http://cabinnovation.com/content/editions>

Conception optimale



Conception optimale

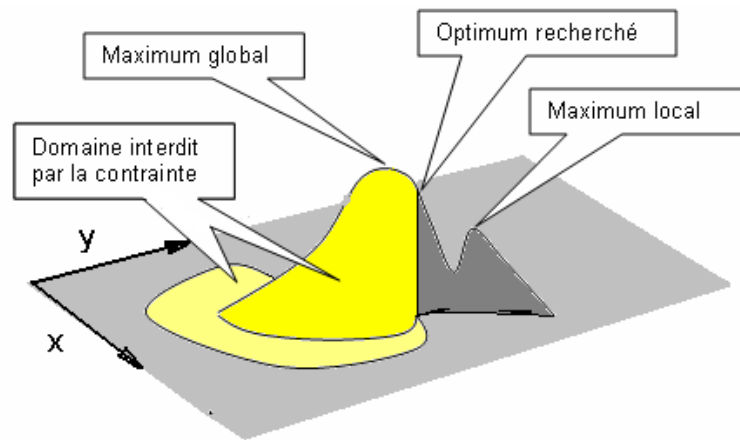
L'optimisation peut porter sur la conception d'un produit élémentaire ou celle d'un système complet mettant en œuvre des technologies multiples faisant appel à divers métiers :

- forme à donner à une pièce pour remplir au mieux ses fonctions,
- architecture et caractéristiques du soutien logistique d'un système devant assurer un service pendant une durée de mission.

Elle peut également concerner des étapes particulières de l'activité de conception (plan d'expériences, ajustement de modèle, ordonnancement, planification optimale des essais, etc.)



Conception optimale



$$X \in \mathbb{R}^n$$

$$X_e / f(X_e) = \min/\max f(X)$$

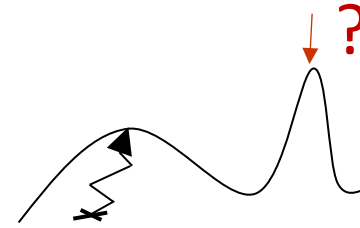
$$C_i(X) \geq 0$$

La plupart des problématiques industrielles d'optimisation est de type paramétrique :

- une fonction de performance peut être établie en fonction de diverses variables de décision,
- l'objectif est de trouver le maximum ou le minimum de cette fonction dont les variables peuvent être soumises à des contraintes qui en limitent le domaine de variation.



Conception optimale



Méthodes d'optimisation nombreuses et propres aux types de problème :

- annulation et changement de signe de la dérivée d'une fonction dérivable,
- déplacement dans la direction de pente maximale (gradient ou pseudo-gradient),
- recherche locale (gradient, Nelder-Mead...) ou globale (algorithmes génétiques, recuit simulé...)...

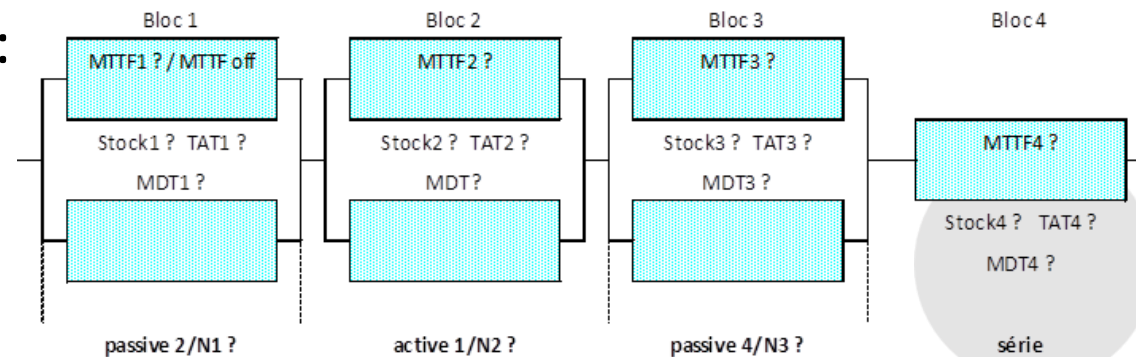
Les méthodes globales sont très lentes à converger et ne garantissent pas l'optimalité (recherche aléatoire).

Les méthodes hybrides :

- évitent le blocage sur un optimum local ou la nécessité de démarrer le traitement à partir d'une bonne solution,
- accélèrent fortement la vitesse de convergence et améliorent la qualité des solutions trouvées,
- permettent de trouver des solutions difficiles à imaginer car situées au-delà du voisinage des solutions connues.

Conception optimale

- L'optimisation peut être réalisée au moyen d'outils génériques relativement faciles d'emploi.
- Optimisation SdF / SLI :



ELEMENTS	MTTF ON (heure)	Nb	Type de redondance	MTTF OFF (heure)	Taux d'utilisation (%)	Durée de reconfig. (heure)	MDT (heure)	Nombre d'opérateurs (1 ou n)	Stock de rechanges	TAT (heure)	Nombre de réparateurs (1 ou n)	Disponibilité à t infini	Coût (€)
Bloc 1	3836		passive 2/3	115079		50	102		2	502		0,9683	113160
Bloc 2	2936		active 1/3				408		3	525		0,9863	100664
Bloc 3	4479		passive 4/6				162		3	510		0,9883	150689
Bloc 4	6709		série				101		1	671		0,9755	83687
\$ ENSEMBLE												0,9207	448200
												≥	↓
Objectif :												0,92	

Outil Gencab de Cab Innovation



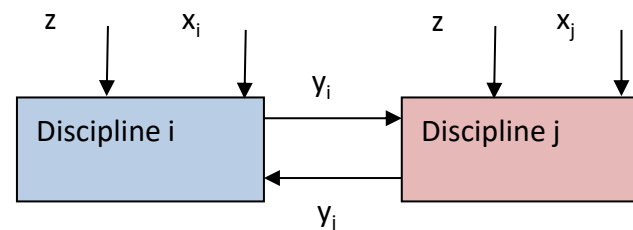
Optimisation multidisciplinaire

Cherche à trouver les meilleurs compromis entre disciplines (métiers)

- L'optimum global résulte rarement de la juxtaposition des optima locaux.

Un système multidisciplinaire comprend :

- des variables globales
- des variables locales propres à chacune des disciplines
- des variables de partage qui sont des sorties des différentes disciplines



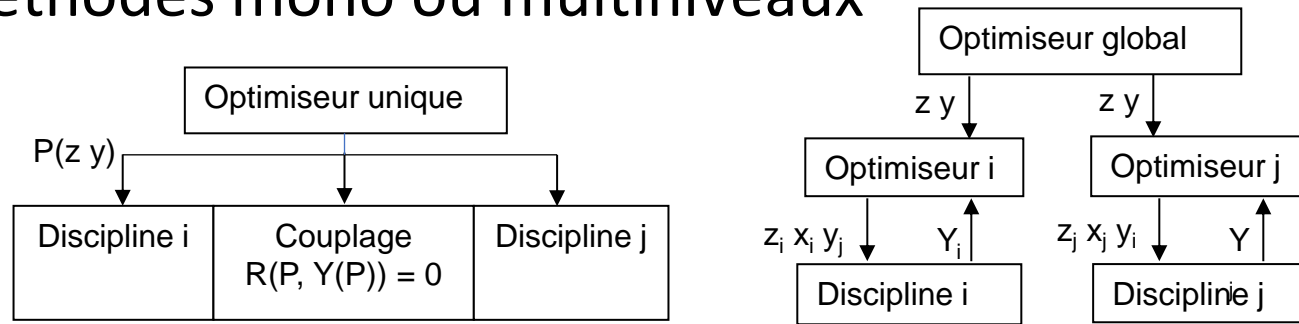
Système multidisciplinaire

z : variables globales x : variables locales y : variables de partage



Optimisation multidisciplinaire

Méthodes mono ou multiniveaux



L'algorithme du gradient est utilisée en aéronautique pour améliorer les solutions aérodynamiques et structurelles des ailes d'avion :

- dérivées calculées par la méthode adjointe à partir du résidu $R(P, Y(P)) = 0$,
- gain de quelques % apportée par l'optimisation locale.

L'optimisation hybride permet de trouver des solutions radicalement nouvelles :

+ 30 % d'élongation apportée au drone Cabiota de Cab Innovation.



Optimisation de forme



Porte sur une courbe, une surface ou un volume à la frontière d'une pièce.

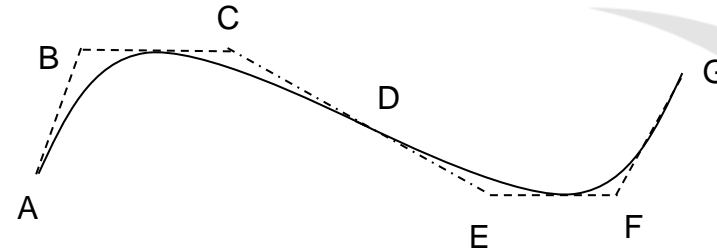
Se distingue de l'optimisation topologique qui cherche à trouver la répartition de matière optimale dans le volume d'une pièce soumise à des contraintes.



Optimisation de forme

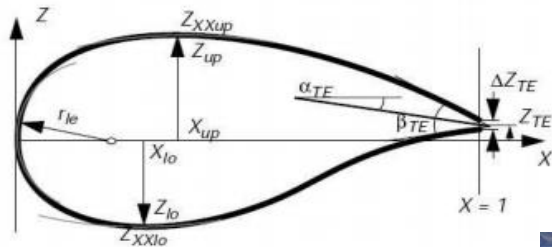
Modèles analytiques paramétriques :

- Courbes de Bézier



$$P(t) = A (1 - t)^3 + 3 B t(1 - t)^2 + 3 C t^2(1 - t) + D t^3(1 - t) \text{ avec } 0 \leq t \leq 1$$

- Méthode PARSEC :



Pale de rotor d'hélicoptère (drone)

Forme définie par une courbe de Bézier (7 points)

Position	Corde	Incidence	RPM
A	0	0,11422497	361,230466
B	0,00033642	0,07135392	
C	0,01226286	0,098887236	
D	0,0642245	0,10290482	
E	0,54048605	0,139728643	
F	0,96501613	0,33996034	
G	1	0,208617134	

Profile aérodynamique

Pente : 5,987621166
 alpha_0 : -0,017739686
 Cz_max : 0,9945
 alpha_max : 0,148352986
 a : 5,642728464
 b : 1,641403175
 c : -0,120321137
 d : 0,022

t	Position	Corde	Incidence	Cz	Cx	Vitesse	Portance/m	Trainée/m	Portance	Trainée	Couple
0	0	0,11422497	0,00189042	0,09489942	0,021778447	3,782796595	0,1002811	0,02301349			
0,1	0,00059857	0,10338186	-0,00199267	0,09428716	0,021766802	7,56559319	0,36070438	0,08327094	0,00013797	3,18094E-05	3,19998E-06
0,2	0,00201222	0,0961995	-0,00120088	0,09902808	0,021857885	11,34838979	0,79317348	0,17507251	0,00081559	0,000182603	1,86277E-05

Corde

Incidence

0,7	0,87249804	0,23080533	0,11052721	0,70801359	0,03637029	30,26237276	113,982364	5,39804313	8,05125354	0,387267995	0,376601885
0,8	0,93496665	0,25159393	0,09158662	0,65460449	0,029083423	34,04516936	123,412363	5,48308794	7,41960746	0,340082202	0,351973737
0,9	0,97815627	0,23856783	0,05905671	0,4598277	0,021781186	37,82796595	101,484922	4,80715257	4,85661382	0,222215774	0,239583329
1	1	0,20861713	0,01106456	0,17246891	0,020877291	41,61076255	40,2754746	4,87532979	1,54828817	0,105750782	0,116325861

Corde min : 0,09056291 ≥ 0,01
 Corde max : 0,25159393 ≤ 0,4

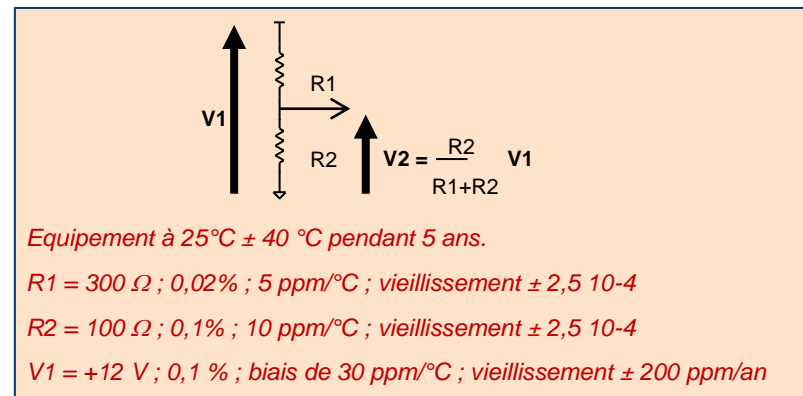
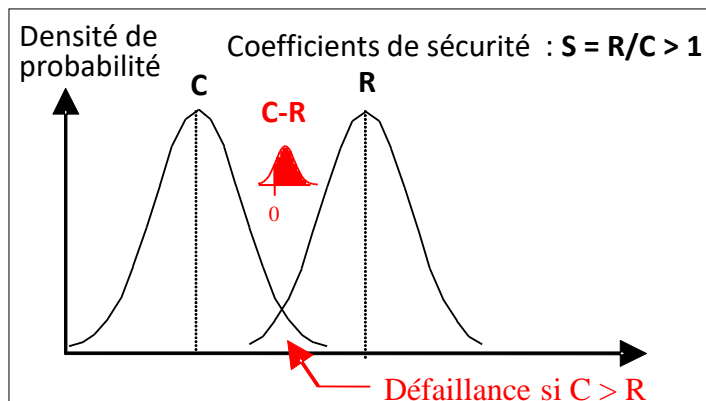
Poids (kg) : 4
 Puissance : 4,00006055
 Puissance : 72,6196168 Watt



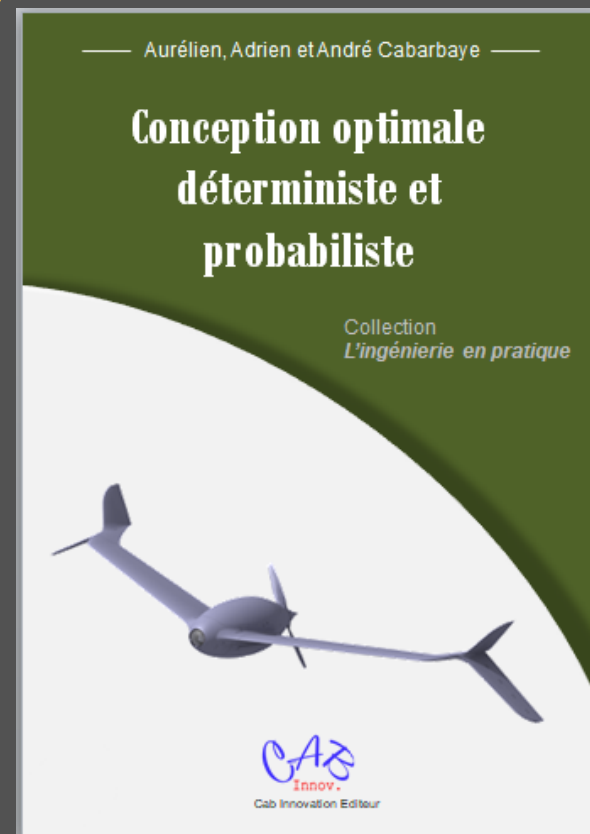
Conception optimale

Des marges de dimensionnement peuvent couvrir les aléas et dispersions à travers des coefficients de sécurité ou des analyses de pire cas :

- les coefficients de sécurité se veulent conservatifs mais ne garantissent pas toujours la maîtrise des dispersions,
- les analyses de pire cas combinent les conditions extrêmes d'utilisation, d'environnement et d'interface mais peuvent conduire à un surdimensionnement pour absorber des pics de charge peu réalistes.



Conception optimale déterministe / probabiliste



Dimensionnement déterministe / probabiliste

L'optimisation peut porter sur un dimensionnement déterministe pour lequel :

- le produit doit assurer une mission de référence,
- les aléas et dispersions de toute nature sont couverts par des marges à travers des coefficients de sécurité ou des analyses de pire cas.

L'optimisation peut être également menée selon approche probabiliste pour:

- optimiser l'offre de service d'une mission qui est, elle-même, généralement soumise à une demande aléatoire (nombre d'utilisateurs, prises d'image d'un satellite d'observation...),
- réduire les marges tout en maîtrisant les dispersions et aléas de toute nature, liés à la mission, à l'environnement et à l'état de dégradation.

Cette seconde approche concerne notamment le dimensionnement optimal des structures et mécanismes qui nécessite une estimation précise de la propagation des incertitudes.



Dimensionnement déterministe / probabiliste

Dimensionnement	Déterministe	Probabiliste
Exigence de dimensionnement	Coefficients de sécurité (CF) Dimensionnement pire cas	Définition d'un niveau de risque tolérable
Paramètres	Valeur fixe avec tolérance éventuelle (caractéristiques d'un acier)	Variable aléatoire (caractéristiques d'un acier)
Variables de décision	Valeur numérique ou alphanumérique (choix d'une référence d'acier, de sa dimension...)	Idem
Contraintes de dimensionnement	Résistance > Contrainte × CF Tenu en pire cas	Niveau de risque résiduel < niveau de risque tolérable
Critère de conception	Coût, masse...	Idem



Dimensionnement probabiliste

Le système peut :

- répondre à plus de sollicitations que celles d'une mission de référence quand les ressources disponibles le permettent,
- exploiter des ressources avantageuses en limite de capacité (classes de satellites ou de lanceurs par exemple),
- ne pas couvrir certaines situations exceptionnelles, en raison de performances insuffisantes ou d'un manque transitoire de ressources, s'il répond aux exigences de disponibilité de service et de sécurité.

Le dimensionnement probabiliste offre aux concepteurs une plus grande liberté dans leurs choix de conception, mais ils doivent alors démontrer formellement que les risques sont bien maîtrisés.



Dimensionnement probabiliste

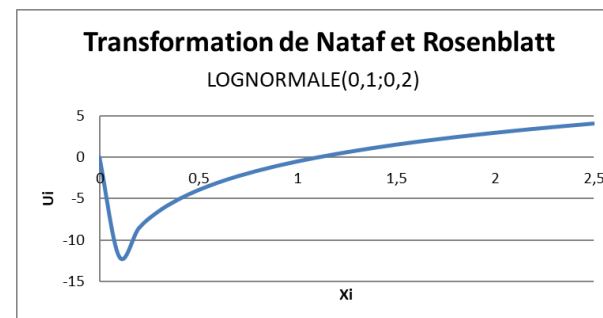
La validation du système ne se limite plus à la vérification d'une mission de référence unique et peut être supportée par :

- la simulation de Monte-Carlo
 - La validation du dimensionnement repose sur la qualité des simulateurs utilisés.
 - La précision des résultats peut être améliorée par des techniques de réduction de variance (échantillonnage stratifié ou échantillonnage d'importance).
- des méthodes analytiques fondées sur des variables gaussiennes (FORM-SORM...)
 - Les variables aléatoires quelconques sont alors transformées en variables normales centrées réduites (Nataf et Rosenblatt) :

$$U_i = \Phi^{-1}(F_i(X_i)) \text{ ou réciproquement : } X_i = F_i^{-1}(\Phi(U_i))$$

F_i : fonction de répartition de la variable X_i

Φ : fonction de répartition de la loi normale centrée réduite



Couplage optimisation simulation

Optimisation sur des valeurs moyennes ou des quantiles de la fonction de performance

Très pénalisant en temps de calcul

- Nécessite des algorithmes spécifiques pour éliminer rapidement les mauvaises solutions sans perdre les meilleures

SIMULATEUR DE CONSTELLATIONS DE SATELLITES

Initialisation Pas à pas Simulation

	TO	TI	TTF	TJ	deltaT
	0	4,7025		4,7075	0,005

Lanceur			
Nb lancements	1	1	
Nb satellites	15	15	
Déploiement	VRAI	FAUX	FAUX

SAT1	Usure	1,3837	1,3786
	Défaillance	10,226	10,221
	Satellite	1	1,3837
SAT2	Usure		
	Défaillance		
	Satellite	0	0
SAT3	Usure	0,5631	0,558
	Défaillance	2,1038	2,0987
	Satellite	1	0,5631
SAT4	Usure	1,1771	1,172
	Défaillance	9,0734	9,0683
	Satellite	1	1,1771
SAT5	Usure	0,5353	0,5302
	Défaillance	1,297	1,2919
	Satellite	1	0,5353
SAT6	Usure	0,7137	0,7086
	Défaillance	5,2687	5,2636
	Satellite	1	0,7137
SAT7	Usure		
	Défaillance		
	Satellite	0	0

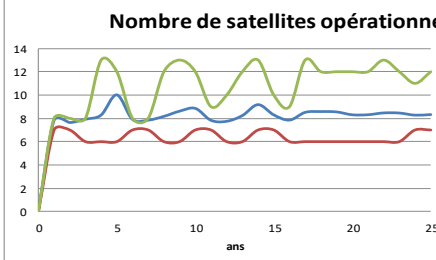
MISSION & STRATEGIE			
Délai pendant déploiement :	0,25		
CU redondée :	VRAI		
Nb sat mission (besoin) :	6		
Nb sat min (critère lancement) :	7		
Durée renouvellement (ans) :	25		
Nombre lanceurs max :	1000		
Anticipation :	VRAI		

PARAMETRES LANCEUR			
Choix du lanceur :	Véga		
Taux réussite :	0,98		
Délai réservation :	0,25		
Capacité :	8		

DECISION LANCEMENT			
Nombre satellites ok :	12		
Fin renouvellement :	FAUX		
Décision lancement :	FAUX		
Pendant déploiement :			
Sans anticipation :			
Anticipation :			
Prochain lancement :			

TABLE D'AFFECTATION			
Sat	Etat	Affectation	Durées
1	1	FAUX	1,38369
2	0	FAUX	
3	1	FAUX	0,56308
4	1	FAUX	1,17708
5	1	FAUX	0,53529
6	1	FAUX	0,71368
7	0	FAUX	
8	1	FAUX	0,12089
9	1	FAUX	0,62242
10	1	FAUX	0,2082
11	1	FAUX	0,0837
12	0	FAUX	
13	1	FAUX	0,79932
14	1	FAUX	0,00505
15	1	FAUX	0,52031
16	0	FAUX	
17	0	FAUX	
18	0	FAUX	
19	0	FAUX	
20	0	FAUX	
21	0	FAUX	
22	0	FAUX	
23	0	FAUX	
24	0	FAUX	
25	0	FAUX	
26	0	FAUX	
27	0	FAUX	
28	0	FAUX	
29	0	FAUX	

Nombre de satellites opérationne



	moenne	écart-type
Nb satellites consommés	51,56	4,66
Nb lanceurs consommés	6,45	0,58
Nb satellites ok (1 à 20 ans)	8,45	0,39
Disponibilité nominal (1 à 20 ans)	0,98	0,01

Optimisation du déploiement et du renouvellement d'une constellation de satellites

Méthode Form-Sorm

Généralise la méthode Résistance-Contrainte à des variables multiples normales centrées réduites (First Order - Second Order Reliability Method)

- Domaine de défaillance : $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ ou $g^*(u_1, u_2, \dots, u_n) \geq 0$
- Point de conception (le plus proche de l'origine en limite de fonctionnement) :

Distance minimale ($\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$) sous contrainte $g^*(u_1, u_2, \dots, u_n) = 0 \rightarrow \beta$

- Probabilité de défaillance :

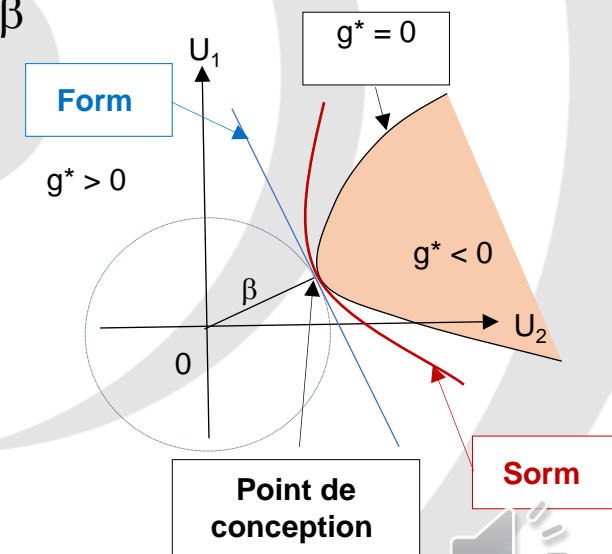
Rapport des (hyper)volumes passant par le point de conception

FORM : approximation linéaire : $\Phi(-\beta)$

SORM : approximation quadratique

- Conception optimale :

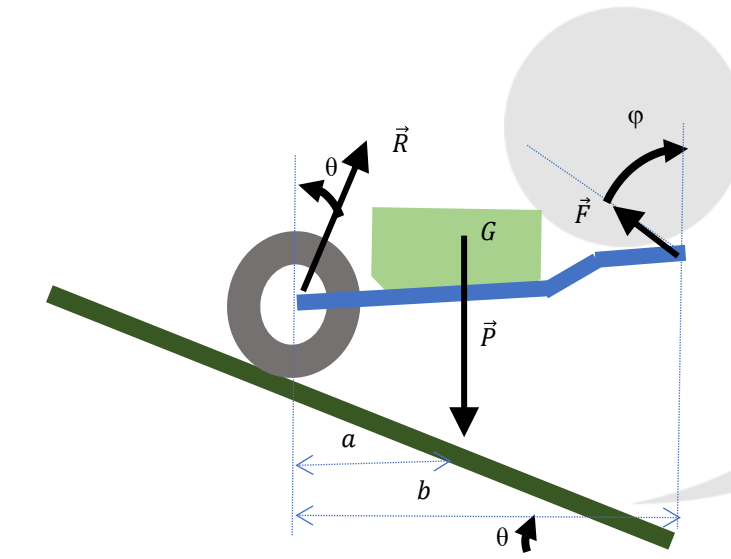
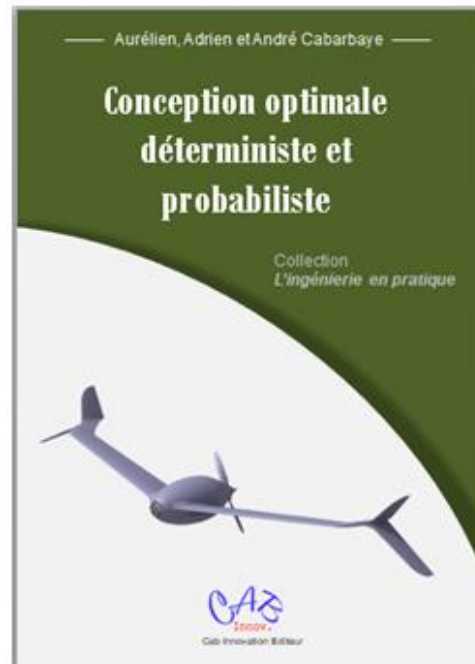
Optimisation à 2 niveaux sous contrainte d'un niveau de risque limité



Conclusion

La conception optimale déterministe et probabiliste s'impose dorénavant pour mieux répondre aux besoins tout en respectant les contraintes sociales et environnementales.

L'ouvrage du même nom en vulgarise les fondements théoriques qu'il illustre de cas d'application pratiques, dont notamment un cas d'école relatif au dimensionnement d'une brouette.





D'autres questions ?

Contact@cabinnovation.com

