

**Apport de
l'optimisation hybride
à la conception et
l'exploitation des systèmes**

André Cabarbaye

CAB INNOVATION

3 rue de la Coquille 31500 Toulouse

Contact@cabinnovation.com

Introduction

- ❑ L'optimisation, c'est la recherche de la meilleure solution (fonctionnement, utilisation, organisation, etc.)
- ❑ Mais en dépit de problématiques concrètes :
 - amélioration de performances,
 - réduction des coûts,
 - affectation des ressources,
- ❑ Son usage est rare dans les bureaux d'études :
 - la première solution trouvée est généralement retenue,
 - l'optimisation se limite à la comparaison de quelques solutions ou à l'analyse de sensibilité de quelques paramètres.
- Dans un contexte industriel de plus en plus compétitif et globalisé, une simple solution ne suffit plus.

- ❑ L'innovation requiert dorénavant le meilleur en conception pour pouvoir émerger.
- ❑ Ce meilleur n'est pas apporté par l'intelligence artificielle (IA) qui a des capacités extraordinaires pour exploiter les connaissances acquises, mais ne produit pas de connaissance nouvelle.
- ❑ L'humain garde toute sa place, s'il veut bien se donner la peine d'utiliser des outils d'optimisation adaptés et de formaliser ses problématiques pour :
 - identifier les variables de décision sur lesquelles agir,
 - choisir un critère d'optimisation sous la forme d'une fonction de performance (ou plusieurs en optimisation multicritère),
 - exprimer d'éventuelles contraintes sous la forme d'inégalités interdisant certaines configurations des variables de décision.

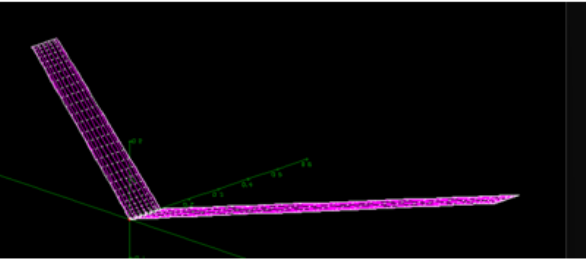
- ❑ Les outils d'optimisation doivent avoir :
 - un caractère générique et facile d'emploi pour les concepteurs,
 - la possibilité de se coupler à des logiciels spécialisés d'évaluation des performances (CFD, FEA, etc.)
 - une capacité à trouver des optima globaux dans des temps raisonnables.

- ❑ Répondant à ces enjeux, le logiciel Cab Designer se singularise par :
 - un algorithme d'optimisation hybride (algorithmes génétiques & simplexe) dans l'environnement Excel,
 - une capacité de couplage à des « outils métier » fonctionnant sous Windows,
 - une méthode de réduction des temps de calcul entre optimisation et simulation de Monte-Carlo.

Optimisation d'une aile d'avion *(couplage avec le simulateur aérodynamique AVL)*

- Choisir la masse, la vitesse de croisière et l'envergure de l'aile

AVL (Athena Vortex Lattice) - Massachusetts Institute of Technology



Chemin d'accès de avl.exe : C:\AVL
Chemin d'accès du projet : C:\AVL\Project1

Mach :	0	
Masse :	4	kg
Vitesse :	30	m/s
Envergure :	1,6	m

Profil racine :	1
Profil saumon :	6
Allongement (Aspect Ratio) :	10,06507749
Effilement (Taper Ratio) :	0,607038469
Vrillage (Twist/Washout) :	-5,700862738 °
Flèche (Sweep) :	28,12868178 °
Dièdre (Dihedral) :	9,587804079 °

Surface :	0,254344788 m²
Incidence :	5,52167 °
CL :	0,27987
CD :	0,00318
CMA :	-0,242124

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	6	10,06507749	0,607038469	-5,700862738	28,12868178	9,587804079

RESULT

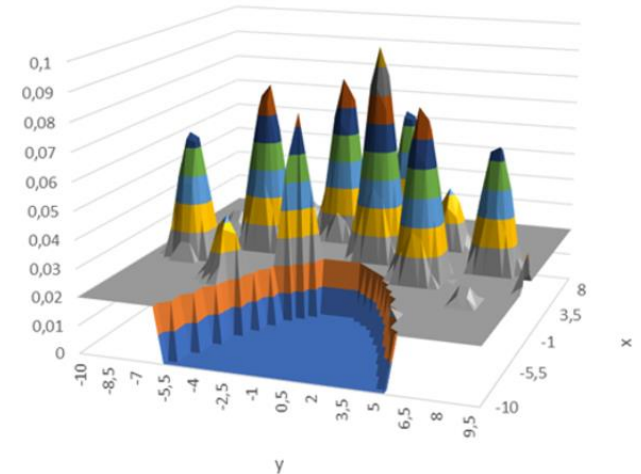
Criteria	0,003180005	Min
Constraints		
-0,05	>=	-0,242124
0,27987	>=	0,27987
Penalty	Factor:	1,00E+09
Objective	-0,003180005	

CD min

CMA ≤ -0,05

$CL \geq 2 \cdot g \cdot Masse / (\rho \cdot Vitesse^2 \cdot Surface)$

Le sommet de cette fonction n'a quasiment aucune chance d'être trouvé par une méthode d'optimisation globale et ne sera atteint par une méthode locale qu'en partant de sa base.



$$\text{MAX}(0,02 ; \text{SIN}(x) * \text{SIN}(y) / (100 + x^2 * y^2)^{1/2})$$

$$x \geq -0,3 \times y^2$$

- L'hybridation de méthodes d'optimisation globale et locale :
- évite le blocage sur un optimum local ou la nécessité de partir au voisinage d'une bonne solution,
 - accélère fortement la vitesse de convergence et améliore la qualité des solutions trouvées,
 - permet de trouver des solutions difficiles à imaginer a priori.

Couplage à des outils métier

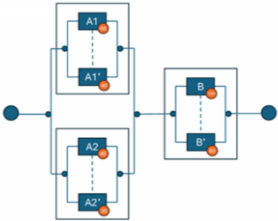
❑ Cab Designer utilise une méthode générique de couplage en ligne de commande dans les premières colonnes de la feuille de calcul :

- écriture de fichiers d'entrée (.txt, etc.),
- lancement de fichiers.bat ou d'exécutables,
- lecture de fichiers de résultats.

	A	B	C	D	E	F
1	Calculation	Write	Write	LaunchWait	Read	Calculation
2						
3		C:\Users\andre\Documents\CABINNOVATION\CLIENTS\TotalGRIF\grif-2024-CABINNOVATION-x64\GRIF2024.17\Travaux\CasTest1ChangeParams.csv	C:\Users\andre\Documents\CABINNOVATION\CLIENTS\TotalGRIF\grif-2024-CABINNOVATION-x64\GRIF2024.17\Travaux\CasTest1ChangeParams.Launch.bat	C:\Users\andre\Documents\CABINNOVATION\CLIENTS\TotalGRIF\grif-2024-CABINNOVATION-x64\GRIF2024.17\Travaux\CasTest1ChangeParams.Launch.bat	C:\Users\andre\Documents\CABINNOVATION\CLIENTS\TotalGRIF\grif-2024-CABINNOVATION-x64\GRIF2024.17\Travaux\CasTest1ChangeParams.Result.xml	All
4	All	id:name;value:description;dimension;unit 1:LambdaB5.0E-5;Other; 2:LambdaB5.0E-5;Other; 3:NbrRepairerIn12;Other; 4:Whb5;0;Other; 5:LambdaA12.0E-4;Other; 6:LambdaA15.0E-4;Other; 7:WhA15;1;Other; 8:LambdaA22.0E-4;Other; 9:LambdaA25.0E-4;Other; 10:WhA25;1;Other;	set PATH=%~dp0\..\BinLib;%PATH% cd /d %~dp0\..\BinPetr12 set NMOPTIONS=-ms128m -ms4G -Xmixed -Djava.library.path=... ..\\java\bin\java %NMOPTIONS% -jar Petr12.jar %WORKDIR%\Ca		<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?> <moca version="14.24.2" grif-version="16.17.0.0" date="1762944329178" endDate="1762944329373"> <options> <option name="Net-Name" value="Cas Test1.jpg"/> <option name="Histo-Done" value="1000?"/> <option name="Seed-Begin" value="12345681?"/> <option name="Seed-Current" value="74805013124377?"/> <option name="Histo-Delay" value="17520.00?"/> </options> <states type="1"> </states> </moca>	

Système de production

Disponibilité maximale sous contrainte de coût



DATA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Name	SupplierA1	SupplierA1s	SupplierA2	SupplierA2s	SupplierB	SupplierBs	VariantA1	VariantA2	VariantB	Nb_repairers
Type	Alphanumeric	Alphanumeric	Alphanumeric	Alphanumeric	Alphanumeric	Alphanumeric	Binary	Binary	Binary	Integer
Min / k	2	2	2	2	3	3				1
Max / n										6
Init / End	2	1	2	1	3	3	1	1	0	2

RESULT	Criteria	86,861	Max	Cost		
	Constraints	140	>=	140	A1s	0
	Penalty		Factor:	1,00E+09	A2s	0
	Objective	86,861			B	60
					Bs	0
					Nb_repairers	40
					Total:	140

Nombre de simulations par évaluation : 10000

Result_value: 86,8618198

Result_standard_deviation: 26,0780499

Couplage avec le logiciel GRIF de TotalEnergies

*Nombre de simulations égal au nombre d'évaluations assurant la convergence, multiplié par le nombre de simulations requis par la précision, soit 25 millions pour une application typique en valeur moyenne (5000 * 5000)*

☐ Cab Designer définit le nombre de simulations de chaque candidat à partir d'une évaluation grossière, selon le principe de l'OCBA.

Choix entre projets

	Ressources			Choix
	Gain	Personnel	Coût	
Projet 1 :	36,07	1,91	1,30	1
Projet 2 :	12,36	2,80	4,01	0
Projet 3 :	18,55	1,82	1,64	1
Projet 4 :	12,21	1,89	3,88	1
Projet 5 :	29,70	1,16	1,18	1
Projet 6 :	16,93	1,02	2,91	1
Projet 7 :	18,79	1,76	3,98	0
Projet 8 :	20,74	1,62	2,23	0
Projet 9 :	21,35	1,08	1,37	1
Projet 10 :	14,71	1,15	1,04	1
Σ :	149,51	10,03	13,32	

RESULT

Criteria **149,5128** Max

Constraints
15 >= 10,02912
20 >= 13,32447

Penalty Factor: 1,00E+15

Objective 149,5128

DATA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Name	Choix_1	Choix_2	Choix_3	Choix_4	Choix_5	Choix_6	Choix_7	Choix_8	Choix_9	Choix_10
Type	Binary	Binary	Binary	Binary	Binary	Binary	Binary	Binary	Binary	Binary
Min / k										
Max / n										
Init / End	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1

Help	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Name	Gain_1	Gain_2	Gain_3	Gain_4	Gain_5	Gain_6	Gain_7	Gain_8	Gain_9	Gain_10	Personnel_1
Law	Triangular	Normal	Lognormal	Uniform	Triangular	Normal	Lognormal	Uniform	Lognormal	Uniform	Triangular
Parameter 1	30	15	3	12	30	15	3	12	3	12	1
Parameter 2	10	5	0,05	24	10	5	0,05	24	0,05	24	1
Parameter 3	40				40						5
Parameter 4											
Parameter 5											
Value	36,07206	12,35641	18,55001	12,21122	29,6965	16,92831	18,78836	20,74279	21,34897	14,7057	1,90516389

Result value : -8,7E+11
Result_standard_deviation : 1,53E+13

RESULTS	1	2	3
Name	Gain	Personnel	Coût
Chart	No	No	No
Output	Average	>	>
Parameter Value	144,5285	0,003	0

Temps de calcul divisé par 10 à 100 selon les conditions demandées.

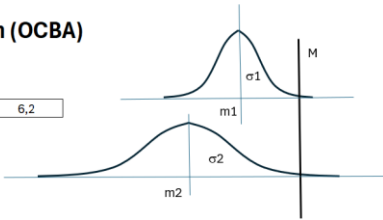
Optimal Computing Budget Allocation (OCBA)

$$N1/N2 : 0,16735537 = (\sigma1/(M-m1))^2 / (\sigma2/(M-m2))^2$$

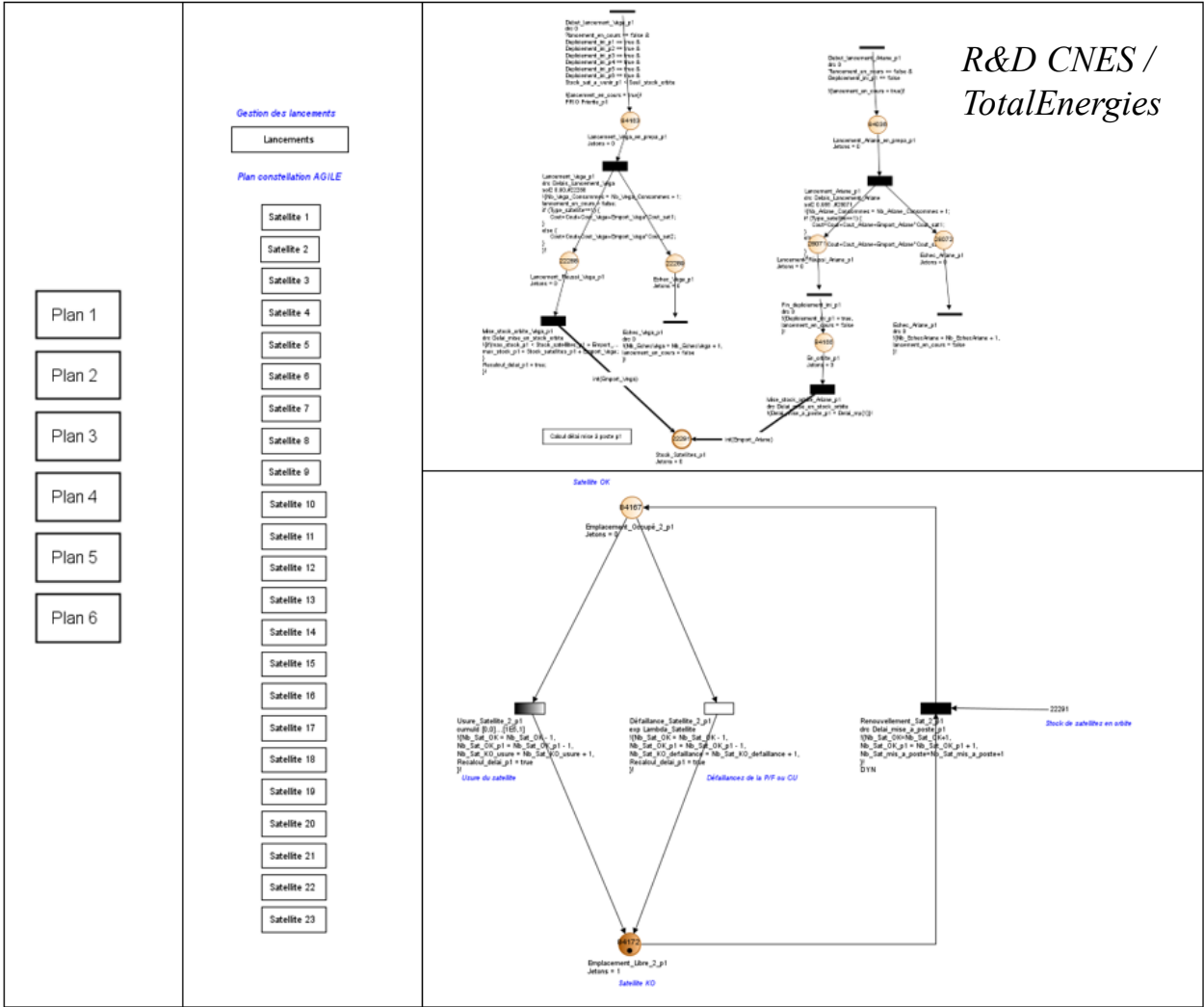
m1 : 4
σ1 : 0,3
N1 : 16,7355372

m2 : 5
σ2 : 0,4
N2 : 100

M : 6,2



❑ Déploiement et renouvellement d'une constellation de satellites placés sur 6 plans orbitaux



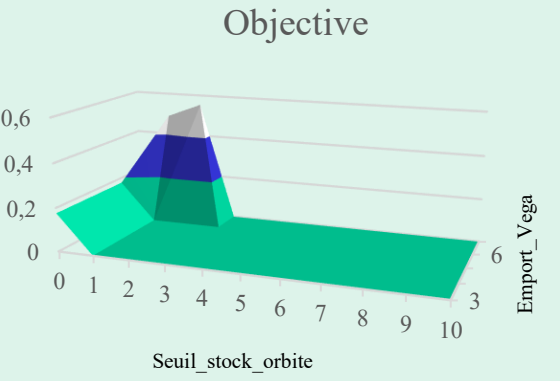
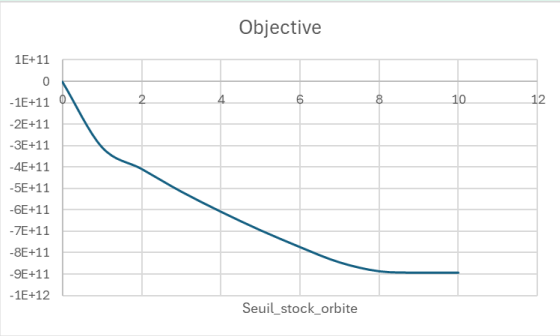
Modélisation par réseaux de Petri stochastiques (GRIF/MOCA-RP)

- *Processus de lancement et de fonctionnement des satellites par plan*
- *Gros (type 1) ou petit (type 2) satellites stockés préalablement en orbite*
- *Lancement par Ariane ou Vega quand stock insuffisant.*
- *Constellation disponible : ≥ 22 satellites opérationnels par plan*
- *Actualisation des coûts par un taux d'intérêt.*

Optimisation

Sensibilité

Configuration 2, 32, 7, 2
Coût ≤ 4500 M€



GRIF/MOCA-RP

Constellation de satellites sur 6 plans



DATA	1	2	3	4
Name	Type_satellite	Emport_Ariane	Emport_Vega	Seuil_stock_orbite
Type	Integer	Real	Real	Real
Min / k	1	22	1	0
Max / n	2	32	7	1000
Init / End	2	27,57971454	6,434378982	261,3682747

RESULT

Criteria 5631,776809 Min

Constraints 0,918015054 >= 0,9

Penalty Factor: 1,00E+09

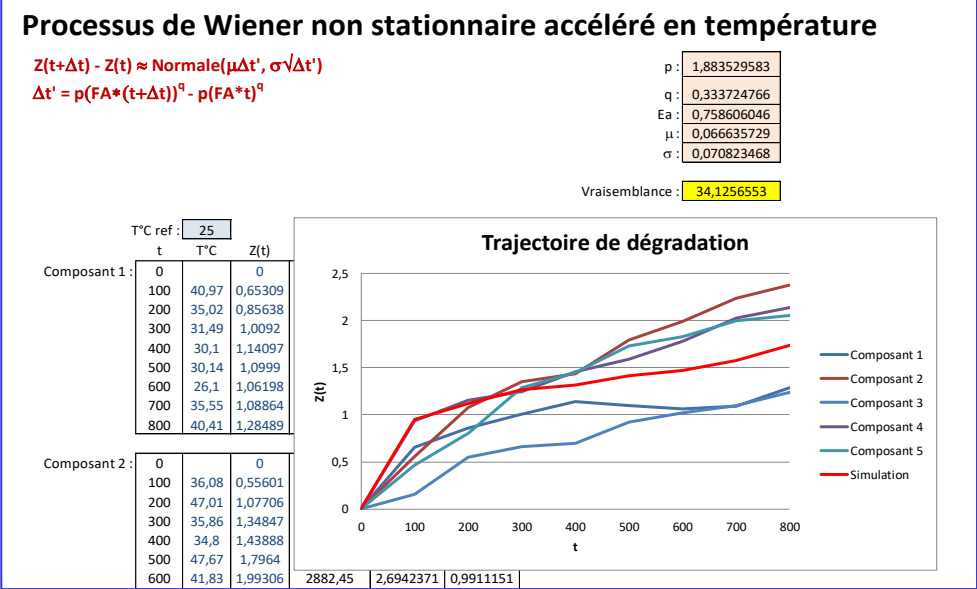
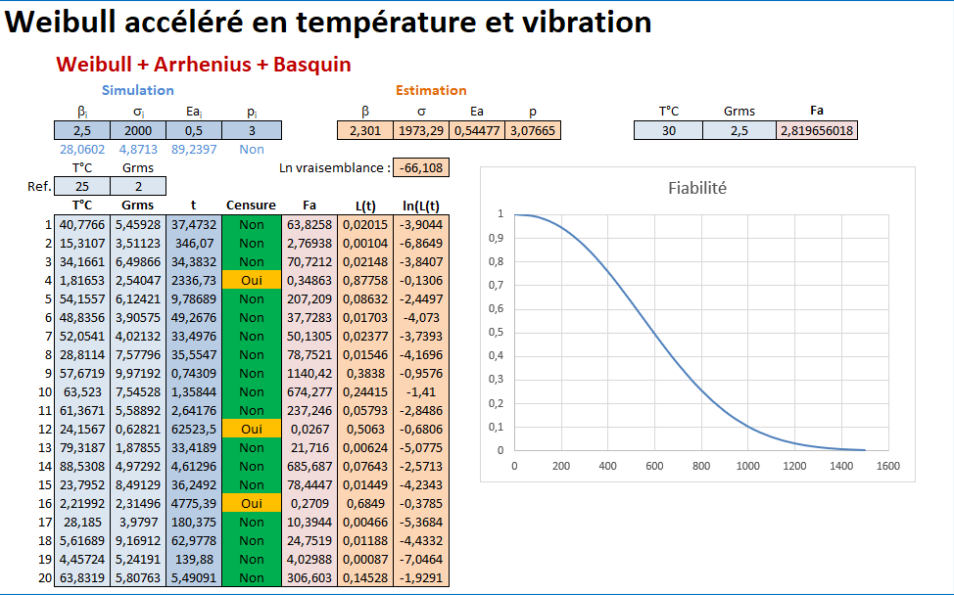
Objective -5,63E+03

Delais Lancement Vega :	2196	hr
Delais Lancement Ariane :	1464	hr
Delai mise en stock orbite :	1464	hr
Durée mission :	131400	hr
Temps de déploiement initial :	8819	hr
Taux :	1,03	%
Quantile du critère :	60%	
Quantile de la contrainte :	40%	
Critère :	5631,776809	
Contrainte :	0,918015054	
μ		
σ		
Temps_disponible :	114914,3411	9406,611137
Coût :	5614,312487	68,93436622
Type satellite :	2	
Nb_sat_Ariane :	28	
Nb_sat_Vega :	6	
Nb_spare :	261	
Nombre d'histoires par évaluation :	5000	

Contrainte : Coût (M€) ≤	Critère : Disponibilité max	Type satellite	Emport Ariane	Emport Vega	Seuil
6000	0,98	2	32	7	861
5500	0,70	2	32	7	5
5000	0,553	2	32	7	2
4500	0,175	2	32	5	0

Contrainte : Disponibilité ≥	Critère : Coût (M€) min	Type satellite	Emport Ariane	Emport Vega	Seuil
0,5	4496	2	32	7	2
0,7	5591	2	32	5	755
0,9	5631	2	28	6	261
0,95	5640	2	30	6	408
0,98	5750	2	31	7	852
0,99	Non atteint				

❑ L'optimisation hybride donne plus de vraisemblance aux données lors des ajustement par la méthode du maximum de vraisemblance.



Ajustement d'une loi de fiabilité et d'un modèle de dégradation

❑ Elle donne des résultats plus précis au calcul de l'indice de fiabilité de la méthode FORM-SORM.

Conclusion

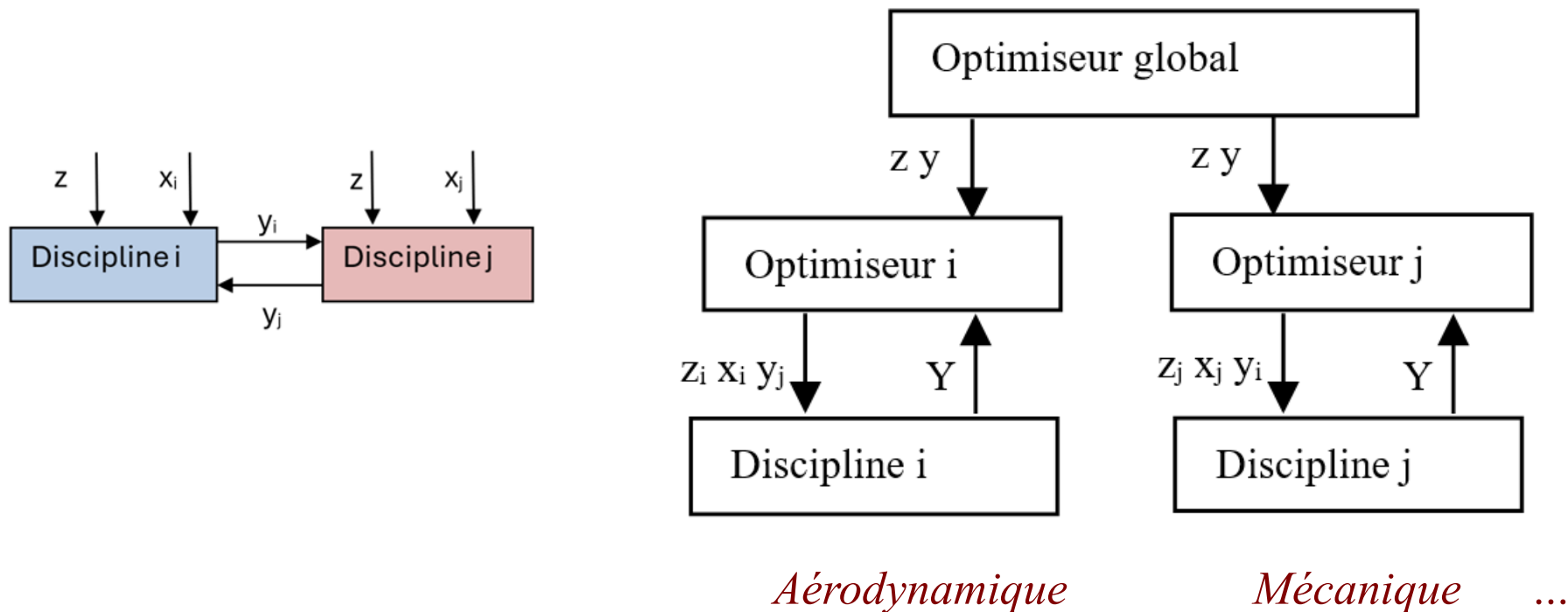
- ❑ Au-delà de l'évaluation des performances au moyen de logiciels spécialisés (CFD, FEA, etc.), l'optimisation de la conception et de l'exploitation des systèmes est réalisable par des algorithmes mathématiques.
- ❑ Il est dorénavant indispensable de rechercher le meilleur en conception, et non pas la première solution qui fonctionne, si on veut innover et pérenniser son activité dans un monde globalisé.
- ❑ L'optimisation hybride s'applique à tous les métiers :
 - pour exploiter les données de retour d'expériences et améliorer le soutien logistique en fiabilité,
 - pour concevoir des drones performants et les avions moins polluants de demain en aéronautique, etc.

Conclusion

- ❑ Cette optimisation ne peut être mise en œuvre que par l'intelligence humaine, car si l'intelligence artificielle sait parfaitement recopier, elle est incapable d'innover en trouvant des solutions véritablement nouvelles.
- ❑ Cependant, les investissements considérables suscités par l'IA dans des formes de calcul constituent une opportunité en optimisation, pour évaluer de multiples solutions candidates.
- ❑ Des développements sont prévus en ce sens pour élargir les capacités de traitement du logiciel Cab Designer à de très gros systèmes.

Conclusion

- De même, Cab Designer sera bientôt doté d'une capacité d'optimisation multiniveau pour répondre plus efficacement aux problématiques de l'optimisation multidisciplinaire,



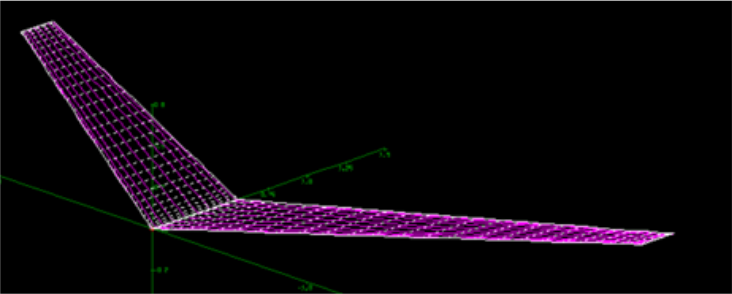
- ainsi que de multiples interfaces de couplage.

❑ Interfaces de couplage

- Opérationnelles
 - ❖ Fiabilité : GRIF
 - ❖ Aérodynamique : XFOIL (2D) / AVL (3D)
- En cours
 - ❖ Aérodynamique : XROTOR (hélice et éolienne)
- Prévues
 - ❖ Structure : CalculiX
 - ❖ Mécanique : MBDyn
 - ❖ Électronique : LTspice / KiCad
 - ❖ Systèmes : OpenModelica
 - ❖ Hydraulique : EPANET
 - ❖ Antennes : NEC2

Optimisation d'une aile d'avion

AVL (Athena Vortex Lattice) - Massachusetts Institute of Technology



Chemin d'accès de avl.exe : C:\AVL
Chemin d'accès du projet : C:\AVL\Project1

Mach : 0
Masse : 15 kg
Vitesse : 40 m/s
Envergure : 4 m

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	3,01	10,60282258	0,371496661	-0,022614819	29,99248606	4,013743401

Profil racine : 1
Profil saumon : 3,01
Allongement (Aspect Ratio) : 10,60282258
Effilement (Taper Ratio) : 0,371496661
Vrillage (Twist/Washout) : -0,022614819 °
Flèche (Sweep) : 29,99248606 °
Dièdre (Dihedral) : 4,013743401 °

RESULT

Criteria	0,000280008	Min
Constraints		
-0,05	>=	-4,600553
0,0995	>=	0,0995
Penalty	Factor:	1,00E+09
Objective	-0,000280008	

CD min

$CMA \leq -0,05$

$CL \geq 2 * g * Masse / (\rho * Vitesse^2 * Surface)$

Surface : 1,509032135 m²
Incidence : 1,23504 °

CL : 0,0995
CD : 0,00028
CMA : -4,600553

La newsletter **Intelligence Optimale** explore la convergence entre IA, physique et mathématiques pour repousser les limites de l'ingénierie :

- Utiliser l'IA pour balayer l'état de l'art et détecter les signaux faibles.
- Déployer l'optimisation hybride pour atteindre l'optimum global, quand les autres méthodes s'essoufflent.
- Coupler les algorithmes aux simulateurs de performances (CFD, FEA) pour trouver des solutions réellement innovantes.

Prochains articles :

1. *Comment l'outil « Cab designer » met l'optimisation de pointe à la portée de tous ?*
2. *Comment l'endurance d'un drone a bondi de plus de 30 % grâce au couplage de l'optimisation hybride aux simulateurs aérodynamiques Xfoil et AVL ?*
3. *Comment le couplage à un outil de modélisation par réseaux de Petri stochastique a permis d'économiser plusieurs centaines de millions d'euros sur une constellation de satellites.*

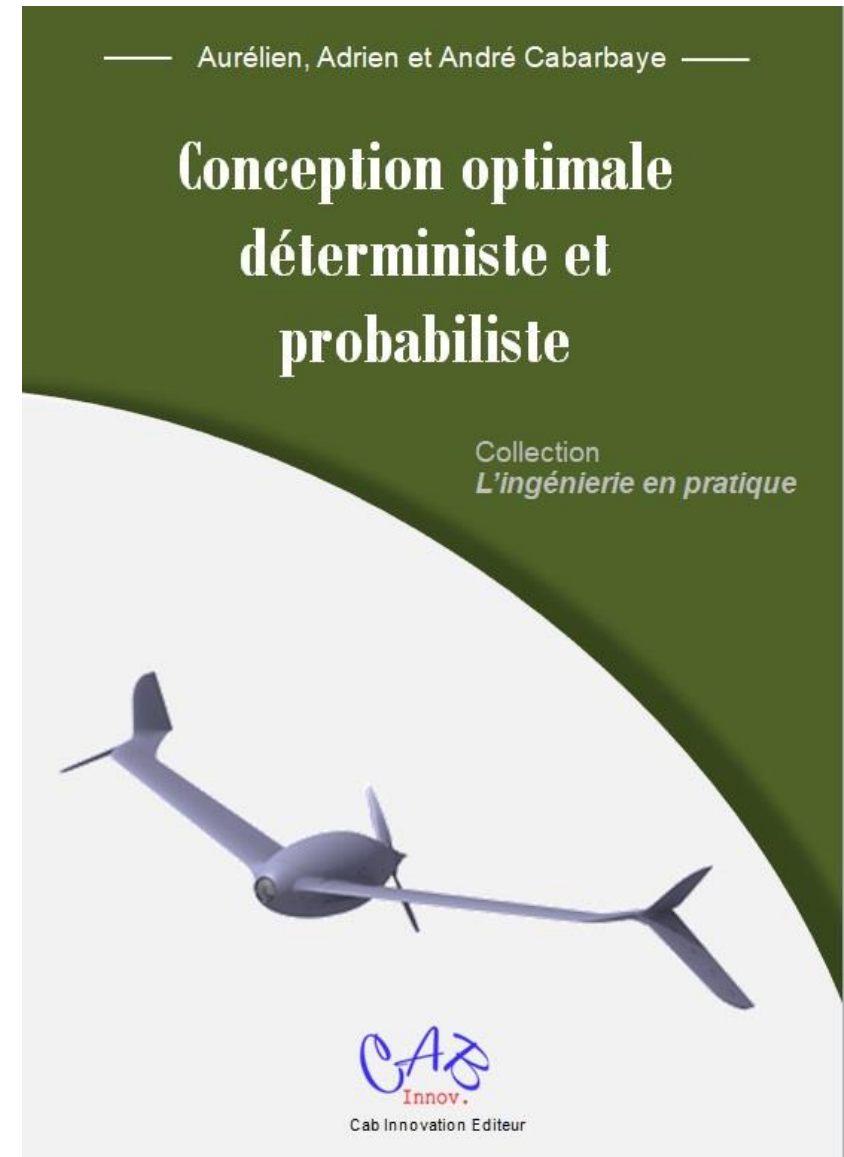
Inscription gratuite : <https://cabarbaye.substack.com>

❑ Cab Innovation Editeur

Boutique (livres et logiciels) :



<https://www.cabinnovation.com/shop/>



ISBN : 979-10-97287-14-6