

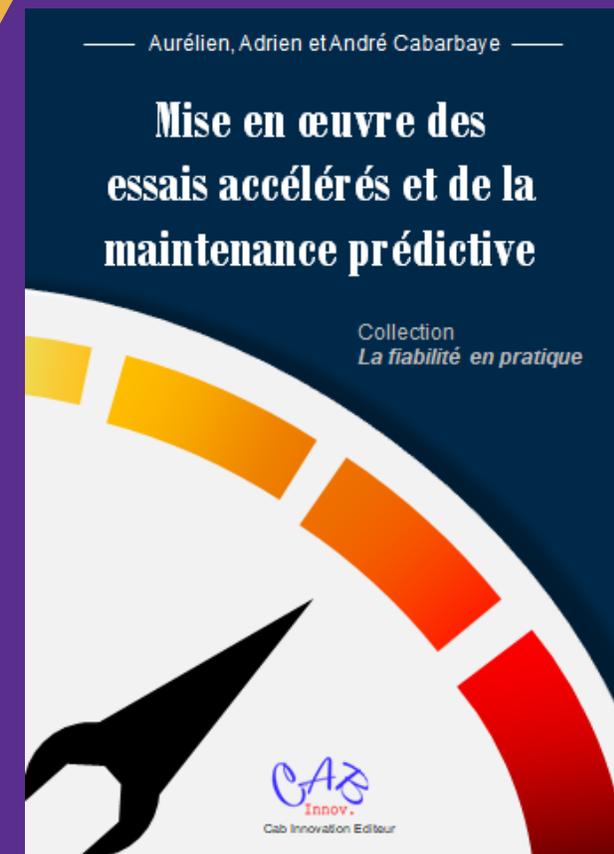
L'IMdR invite un auteur :

**André CABARBAYE**

# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

**3 juin 2022**  
**10h30-12h00**  
**en ligne sur Microsoft TEAMS**

03/06/2022



Cab Innovation  
3 rue de la coquille, 31500 Toulouse  
Tel : 05 61 54 68 08 - [contact@cabinnovation.com](mailto:contact@cabinnovation.com)  
Site : [cabinnovation.com](http://cabinnovation.com)



# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

## Plan de l'intervention :

- ✓ Le contexte (auteurs, Cab innovation et son activité d'édition, l'ouvrage)
- ✓ Les essais accélérés (modèles d'accélération et de dégradation...)

### *Partie préenregistrée*

#### ○ *Réponses aux questions*

- ✓ La maintenance prédictive (Intelligence Artificielle et/ou humaine...)

### *Partie préenregistrée*

#### ○ *Réponses aux questions*

- ✓ Prochaine parution

# L'auteur invité

- Expert senior en Sûreté de Fonctionnement au Centre national d'études spatiales (CNES) jusqu'en 2018,
- Gérant de l'entreprise Cab Innovation depuis 2000,
- Auteur de 80 communications scientifiques environ dont certaines aux congrès Lambda Mu,
- Rédacteur du « Journal du fiabiliste », de ses TP et de ses bêtisiers,
- Animateur du groupe « Sûreté de Fonctionnement » de LinkedIn (4 800 membres).

# Les auteurs : une collaboration familiale



*Docteur ingénieur en aéronautique, Aurélien Cabarbaye mène une activité de R&D sur la maintenance prédictive applicable aux drones.*

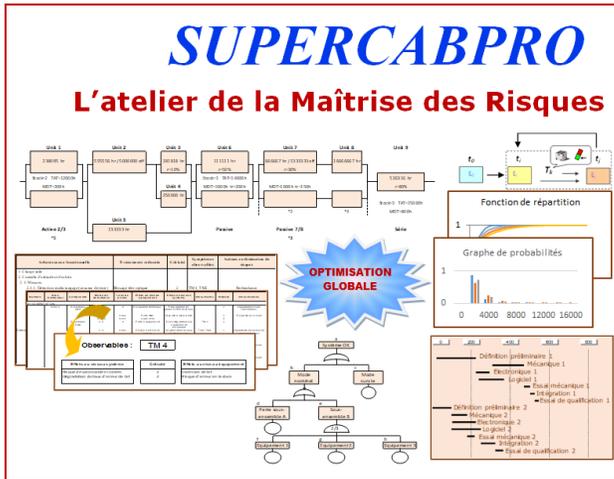


*Ingénieur en informatique et électronique, Adrien Cabarbaye est un spécialiste du Big data et de l'optimisation multidisciplinaire.*



*Expert senior en Sûreté de fonctionnement durant son activité au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), André Cabarbaye est le gérant de la société Cab Innovation.*

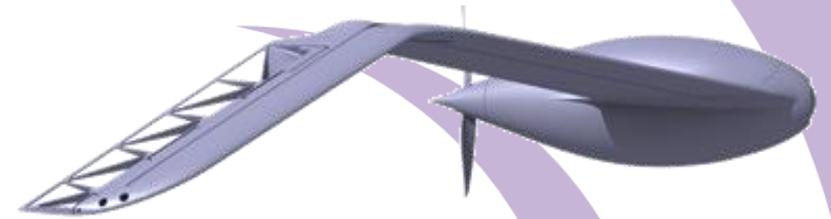
# L'entreprise Cab Innovation



Développement  
d'outils logiciels



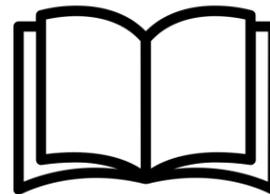
R&D de  
prototypes  
innovants



Etudes  
d'ingénierie



Formation

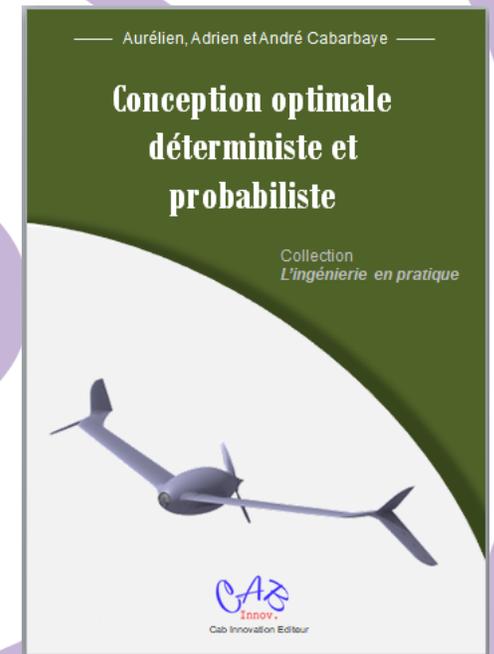
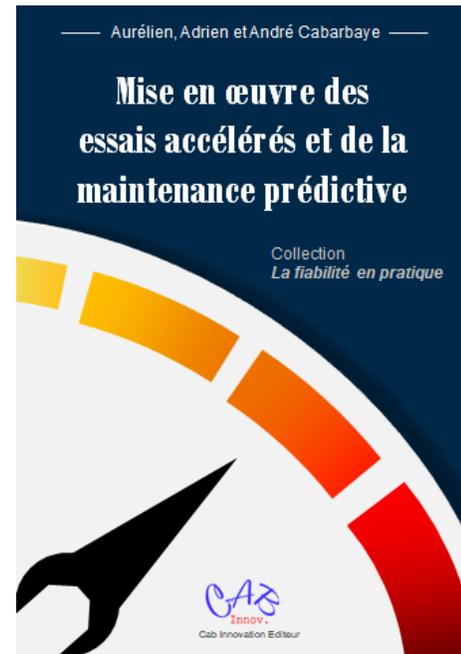


Edition d'ouvrages  
scientifiques et  
techniques



# L'activité d'édition chez Cab Innovation

## *L'ingénierie en pratique*



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

# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

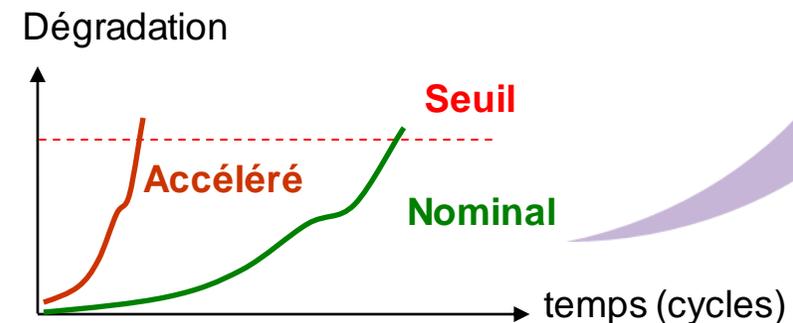
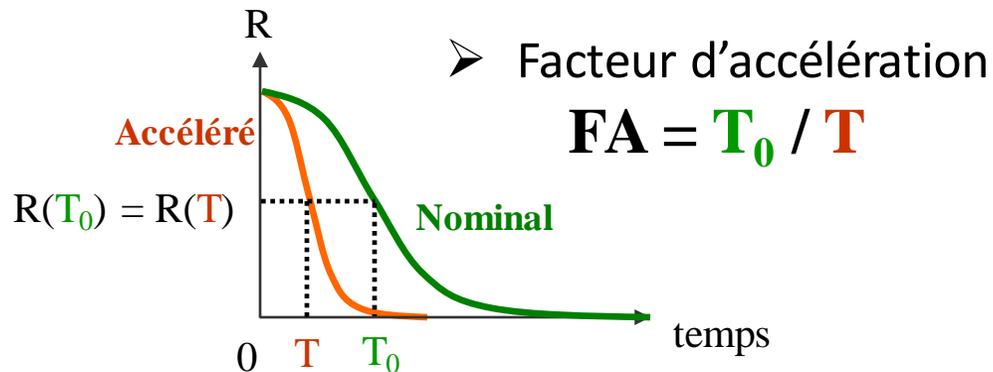
- Rassemble dans un même ouvrage les essais accélérés et la maintenance prédictive qui utilisent chacun un modèle prédictif dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées pour :
  - démontrer la capacité des produits à réaliser leur mission,
  - élaborer un pronostic à partir de l'état courant.
- Enrichit un précédent ouvrage sur les essais accélérés.
- A bénéficié de l'apport de certains industriels dont notamment Alstom sur des modèles d'accélération.

# Les essais accélérés

- Le stress (température, vibration...) augmente le risque de défaillance.
- Ce phénomène est exploité dans le cadre des tests d'endurance ou de fiabilité pour réduire la durée des essais (et/ou le nombre de pièces à tester) en augmentant les niveaux de stress par rapport à ceux de la vie opérationnelle.
- Les essais accélérés permettent ainsi de démontrer la capacité d'un produit à fonctionner correctement durant sa période de garantie et d'établir son modèle comportemental pendant toute sa durée de vie.
- Les contraintes sont limitées au domaine de qualification pour ne pas révéler d'autres phénomènes de défaillance ou de dégradation que ceux qui seront observés en conditions nominales.
- Des lois d'accélération sont à établir pour passer des résultats d'essais aux performances opérationnelles.

# Les modèles d'accélération

- Leur justesse conditionne les résultats d'essais.
  - Une surestimation de l'accélération se traduit par une évaluation optimiste de la fiabilité,
  - Une sous-évaluation engendre des dégradations prématurées ou des défaillances précoces non représentatives durant les essais.
- Les modèles SVA font l'hypothèse que le niveau de stress modifie le paramètre d'échelle de la loi de fiabilité ou de dégradation mais pas sa forme.



# Les modèles d'accélération

- Modèles Standard de Vie Accélérée (SVA) :

- Loi d'Arrhenius (thermique)
- Loi de Norris Landzberg (cyclage thermique)
- Loi de Peck (humidité)
- Loi de Basquin (vibration)
- Loi d'Eyring (thermo-électrique)
- E-model (panne de diélectrique)
- Modèle d'accélération lié aux rayons cosmiques

$$FA = e^{\frac{Ea}{K} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$$

Energie d'activation (paramètre a priori inconnu allant de 0,2 à 1,2 eV)

Température en °K

Température de référence

Constante de Boltzmann

# Les modèles d'accélération

- Les paramètres des lois d'accélération (Ea...) peuvent être obtenus à partir des résultats d'essais eux-mêmes, s'ils sont menés à différentes conditions de stress.

**REX hétérogène en température et vibration**

Simulation				Estimation			
$\beta_i$	$\sigma_i$	$Ea_i$	$p_i$	$\beta$	$\sigma$	$Ea$	$p$
2,5	2000	0,5	3	2,31599	2383,85	0,5147	2,96299
65,5363	6,21084	6,69949	Non				

Ln vraisemblance : -65,305

**Weibull + Arrhenius + Basquin**

Taux de confiance :

	Min	Max	
$\beta$ :	2,31599	2,1482	2,48379
$\sigma$ :	2383,85	2036,66	2731,04
$Ea$ :	0,5147	0,5001	0,52931
$p$ :	2,96299	2,85079	3,07519

Matrice de Fisher :

5,76028	-0,0031	13,564	7,06856
-0,0031	1,6E-05	-0,1158	-0,0369
13,564	-0,1158	1822,75	195,508
7,06856	-0,0369	195,508	101,452

Variance-covariance :

0,19772	81,7328	0,00253	0,0111
81,7328	846504	26,1181	252,07
0,00253	26,1181	0,0015	0,00644
0,0111	252,07	0,00644	0,08841

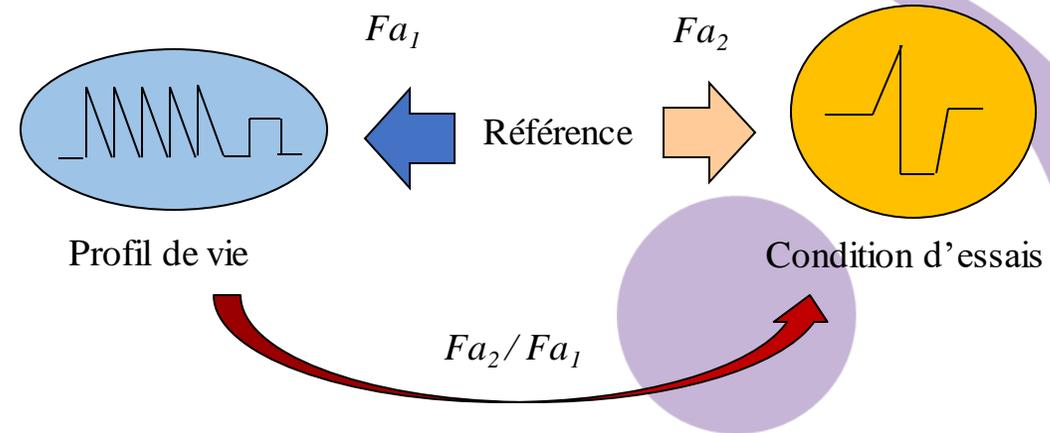
Ref.	T°C	Grms	X	Censure	Fa	L(X)	ln(L(X))
1	70,3981	5,88265	4,25854	Non	346,027	0,12856	-2,0514
2	4,96004	8,78794	60,0307	Non	18,9312	0,0058	-5,1506
3	80,3759	4,57999	11,5643	Non	269,343	0,05805	-2,8465
4	24,0948	8,71919	21,062	Non	73,8153	0,02818	-3,5692
5	42,5115	5,38014	36,3345	Non	57,086	0,02238	-3,7997
6	53,1479	2,71345	74,2298	Non	13,9267	0,0039	-5,5468
7	31,3952	1,5724	1058,84	Oui	0,74706	1	0
8	57,2994	3,5518	17,4336	Non	38,9289	0,00686	-4,9827
9	44,5894	5,065	39,8164	Non	54,032	0,02085	-3,8706
10	18,1562	0,72789	65164,9	Oui	0,03124	1	0
11	66,5524	2,18898	139,412	Non	15,1862	0,0059	-5,1321
12	66,3489	6,21584	7,87697	Non	331,028	0,10569	-2,2472
13	71,4843	9,86982	1,39462	Non	1693,63	0,61079	-0,493
14	27,9859	0,15558	2898522	Oui	0,00063	1	0
15	55,5848	7,32724	2,38715	Non	302,777	0,05743	-2,8572
16	6,49049	8,96617	176,645	Non	22,6005	0,00159	-6,4411
17	70,9282	6,43607	4,49377	Non	463,928	0,18151	-1,7064
18	91,1274	4,16499	9,2969	Non	334,837	0,07229	-2,6271
19	55,7987	3,28415	138,789	Non	28,419	0,00216	-6,1367
20	22,4313	4,16993	221,017	Non	7,40966	0,00289	-5,8471

Exemple d'ajustement réalisé par l'outil  
Gencab de Cab Innovation

# Les modèles d'accélération

- Des stress variables peuvent être pris en compte par le principe de Sedyakin :

$$Fa(S_{Equivalent}) = \frac{1}{t} \int_0^t Fa(S(u)) du$$



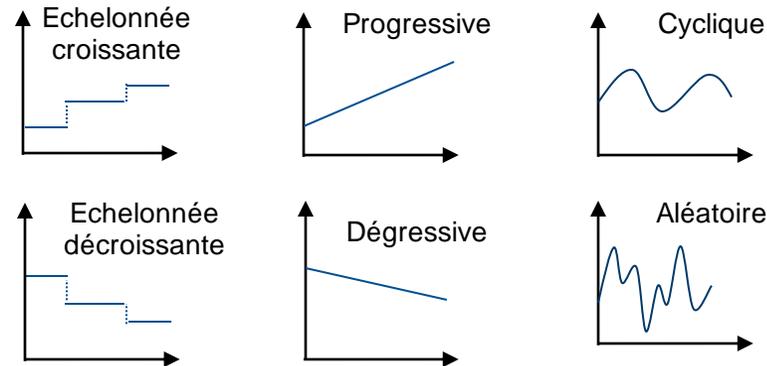
- Un composant peut être affecté par plusieurs phénomènes de défaillance ou de dégradation ayant chacun des conditions d'accélération propres.
- Le dimensionnement d'un essai peut se fonder sur les seuls modes de défaillance prépondérants s'ils ont été correctement identifiés.
- L'ouvrage montre comment établir un plan d'essais et assurer sa mise en œuvre à partir d'une liste de questions préalables.

# Dimensionnement optimal des essais

- Porte sur le dimensionnement préliminaire puis la planification des essais
  - Critères :
    - ✓ durée minimale des essais
    - ✓ nombre minimal de pièces en test
    - ✓ coût minimal (moyens et durée des essais, pièces en test...)
    - ✓ précision des résultats
    - ✓ risque minimal de prolongation des essais ou d'ajout de pièces...
  - Contraintes
    - ✓ objectif de fiabilité à démontrer
    - ✓ niveau de précision requis (intervalle de confiance)
    - ✓ nombre de pièces limité
    - ✓ moyens d'essais limités...

# Dimensionnement optimal des essais

- La planification consiste à choisir une stratégies d'essais ou d'en modifier les conditions en cours de réalisation en fonction des résultats obtenus.



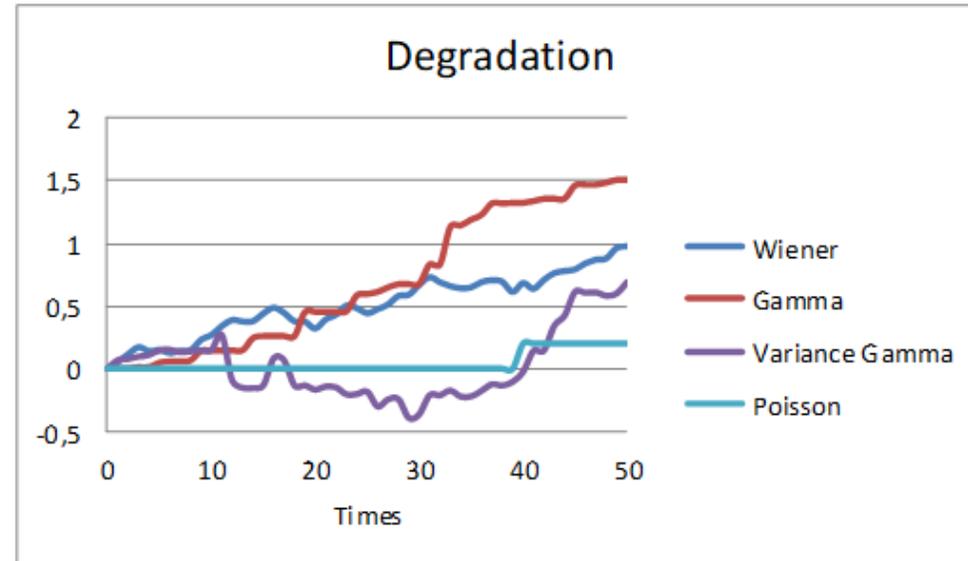
- Ces conditions constituent les covariables d'un plan d'expérience dont la surface de réponse est une courbe de fiabilité ou de dégradation.
- La planification optimale peut se fonder sur la D-optimalité qui consiste à maximiser le déterminant de la matrice de Fisher (inverse de la matrice de variance covariance) afin de minimiser la variance des estimateurs et d'augmenter ainsi la précision des résultats.
- La méthode Caboum associe la D-optimalité à l'inférence bayésienne.

# Les modèles de dégradation

- Les modèles de dégradation sont moins connus que les modèles de fiabilité (Weibull, lognormale...).
- Les modèles explicatifs sont rares car ils nécessitent de connaître précisément la physique des phénomènes (loi de PARIS pour décrire les propagations de fissure...).
- Les modèles à espace d'états (ou multi-états) sont peu utilisés opérationnellement (modèles markoviens considérant des états de dégradation plus ou moins prononcés).
- Les modèles continus portent sur une grandeur physique observable (largeur de fissure, courant de fuite, échauffement...) dont on cherche à modéliser la trajectoire d'évolution.
  - Ces trajectoires peuvent être modélisées par des processus de Lévy choisis selon l'évolution des phénomènes.

# Les modèles de dégradation

- Processus de Lévy :
  - Dégradation croissante monotone  
**Processus gamma**
  - continue avec un bruit aléatoire  
**Processus de Wiener**  
(mouvement brownien avec dérive)
  - avec sauts à différents instants  
**Processus de Poisson composé**
  - discontinue et non monotone  
**Processus Variance Gamma**

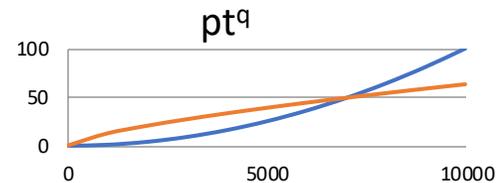


- Ces processus stationnaires sont caractérisés par des incréments indépendants qui ne dépendent que de la longueur de l'intervalle de temps (vitesse moyenne de dégradation constante)

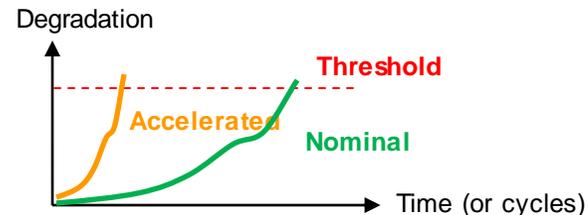
# Les modèles de dégradation

- Les processus de Lévy peuvent devenir non stationnaires par un changement de la variable temps et accélérés par un facteur d'accélération.

$$h' = p(AF*(t+h))^q - p(AF*t)^q$$

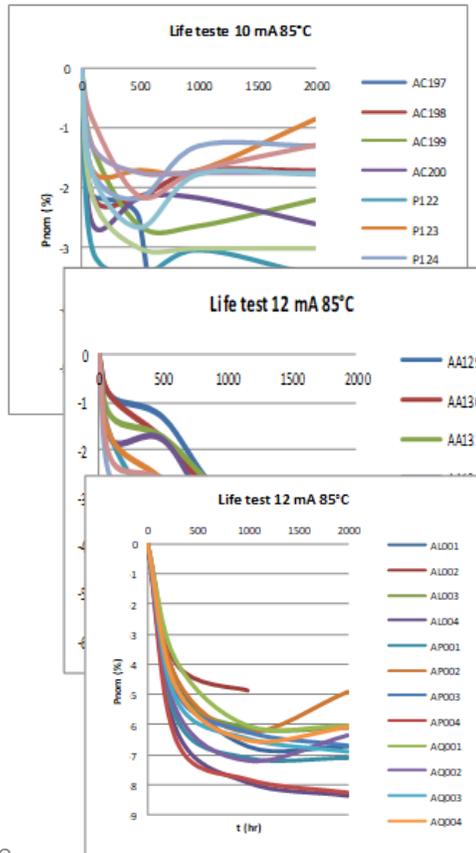


- Le choix d'un seuil de fonctionnement permet de passer d'un modèle de dégradation à un modèle de fiabilité ; la fiabilité correspond alors à la loi du premier franchissement d'un seuil  $\alpha$ .



# Les modèles de dégradation

- Application : caractérisation de composants électroniques soumis à usure (wear out)



## Wiener process accelerated in temperature and current

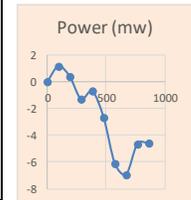
**Ajustement**

σ:	0,989818213
θ:	0,216650209
p:	0,016092456
q:	0,633472823
Ea:	0,523293719
n:	2,554803223

Ln Likelihood:	-3117,029109	All
	-2070,106265	Life test
	-541,985157	Life test without 125°C test
	-324,5861668	Life test without 125°C test, AC197 and AL002

E165	T <sub>REF</sub>		I <sub>REF</sub>		FA	t <sub>equivalent</sub>	Pnom [%]	f(t)	Ln(f(t))
	t	Tj	i (ma)						
0	0	50,345	8			0	0		
1	96	50,351	8		6,1833	1	-1,754386	0,109801	-2,209086428
2	192	85,35	8		38,712	3	-1,3157895	0,260181	-1,346377576
3	288	100,35	8		76,475	5	-2,1929825	0,268419	-1,315205572
4	384	110,35	8		116,89	7	-1,754386	0,215252	-1,535944693
5	480	120,35	8		174,85	10	-0,4385965	0,122911	-2,096297776
6	576	130,35	8		256,38	13	-2,1929825	0,187709	-1,672860554
7	672	140,35	8		369,05	17	-3,9473684	0,183039	-1,698058714
8	768	150,35	8		522,17	22	-5,2631579	0,18538	-1,685349421
9	864	50,35	8		6,1829	22	-6,1403509	0,215331	-1,535580931

Simulation	
Power (mw)	
0	0
1	1,16203682
2	0,391996517
3	-1,29103607
4	-0,716763858
5	-2,663672011
6	-6,12584353
7	-6,930597667
8	-4,634433186
9	-4,604120308



E166	T <sub>REF</sub>		I <sub>REF</sub>		FA	t <sub>equivalent</sub>	Pnom [%]	f(t)	Ln(f(t))
	t	Tj	i (ma)						
0	0	50,344	8			0	0		
1	96	50,35	8		6,1831	1	-1,2931034	0,216344	-1,530885739
2	192	85,35	8		38,711	3	-1,7241379	0,316004	-1,151999435
3	288	100,35	8		76,471	5	-1,7241379	0,267647	-1,318085384
4	384	110,35	8		116,88	7	-1,7241379	0,247197	-1,397569537
5	480	120,35	8		174,84	10	-2,1551724	0,23993	-1,427409787
6	576	130,35	8		256,38	13	-3,0172414	0,221022	-1,50949118
7	672	140,35	8		369,04	17	-3,8793103	0,203749	-1,590865796
8	768	150,35	8		522,14	22	-4,7413793	0,187002	-1,676635882
9	864	50,348	8		6,1823	22	-6,0344828	0,041746	-3,176155747

Simulation	
Power (mw)	
0	0
1	-1,56292698
2	-0,120497695
3	-1,013030372
4	0,547244597
5	0,632073443
6	-0,889204385
7	-4,5351654
8	-4,999594571
9	-5,169295707



$$Ga(m(FA \times (t+Dt) - m(FA \times t), \beta) \quad m(t) = pt^q$$

Confidence rate:  
60%

Confidence interval:

	Min	Max	
σ:	0,9898	-3,251993	5,2316
θ:	0,2167	-1,6404	2,0737
p:	0,0161	-0,121957	0,1541
q:	0,6335	0,593102	0,6738
Ea:	0,5233	0,47055	0,576
n:	2,5548	2,142658	2,9669

Fisher's Matrix:

659,42	-0,025011	20278	3925,6	1124,2	153,13
-0,025	2642,314	35573	7145,7	2101,4	301,79
20278	35572,8	1E+06	216929	62865	8772,4
3925,6	7145,702	216929	43668	12864	1754,3
1124,2	2101,394	62865	12864	4091,4	510,11
153,13	301,7888	8772,4	1754,3	510,11	74,994

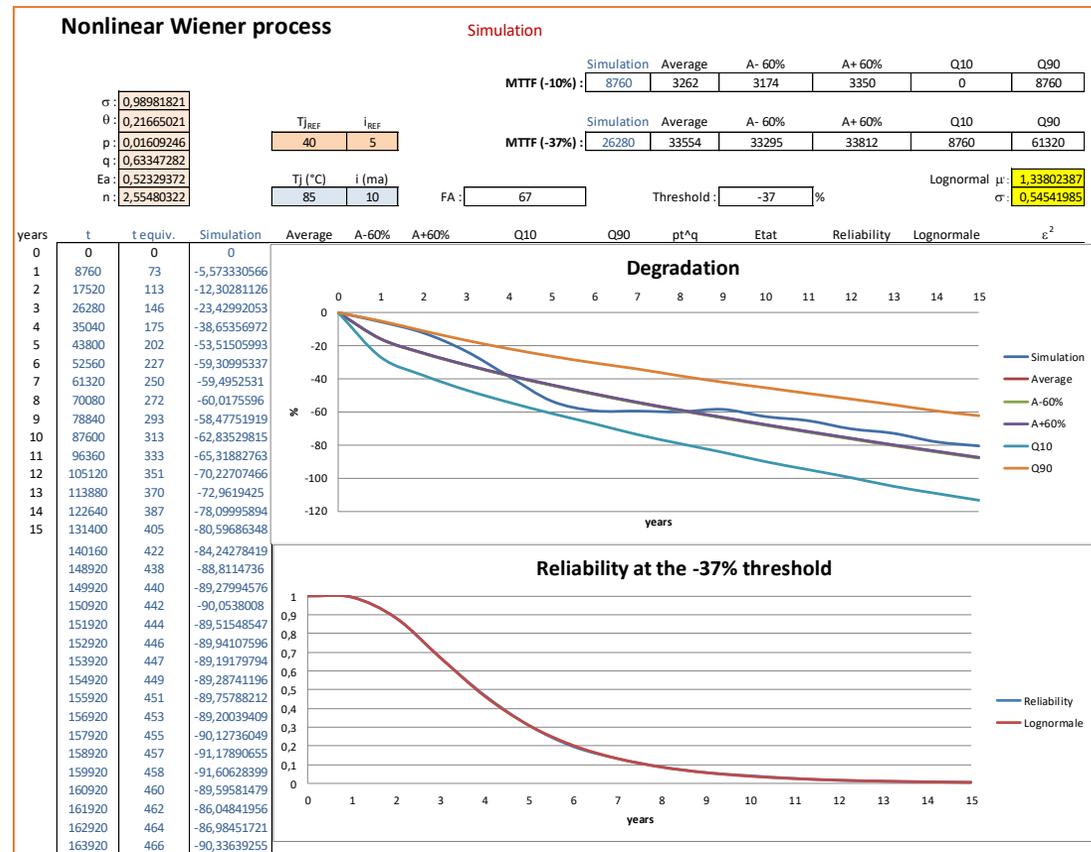
Variance-covariance matrix:

25,402	11,12014	-0,826	-5E-04	0,001	0,0058
11,12	4,868709	-0,362	-2E-04	0,0004	0,0002
-0,826	-0,361582	0,0269	-2E-04	0,0001	-6E-04
-5E-04	-0,000249	-2E-04	0,0023	-0,002	-0,009
0,001	0,000397	0,0001	-0,002	0,0039	0,0039
0,0058	0,000157	-6E-04	-0,009	0,0039	0,2398

Projet RYTHMS de caractérisation d'optocoupleurs (VCSELS) financé par la communauté européenne.

# Les modèles de dégradation

- Trajectoire d'usure et courbe de fiabilité au seuil  $\alpha$



- Simulation de Monte-Carlo ou calcul analytique
- Possibilité d'ajuster une loi de fiabilité (Weibull, lognormale) par la méthode des moindres carrés

A., A. & A. CABARBAYE, Degradation modelling for predictive maintenance under various operating and environmental conditions / ESREL, 2021, Angers.

# La maintenance prédictive

- La maintenance prédictive (ou prévisionnelle) est subordonnée à la surveillance de l'évolution du niveau de dégradation d'une entité afin de retarder les interventions ou inversement de les avancer pour éviter des dysfonctionnements.
- Cette application du Health Monitoring (HM) constitue le Graal des opérateurs de systèmes car elle permet d'améliorer la disponibilité et la sécurité tout en réduisant les coûts d'exploitation, la consommation de ressources et la production de déchets.

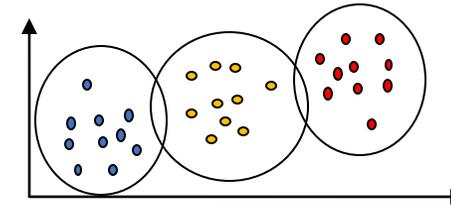
# La maintenance prédictive

- La maintenance prédictive est fondée sur un diagnostic (état de dégradation), un pronostic (potentiel restant) et un critère de décision d'intervention.

Mais comment procéder ?

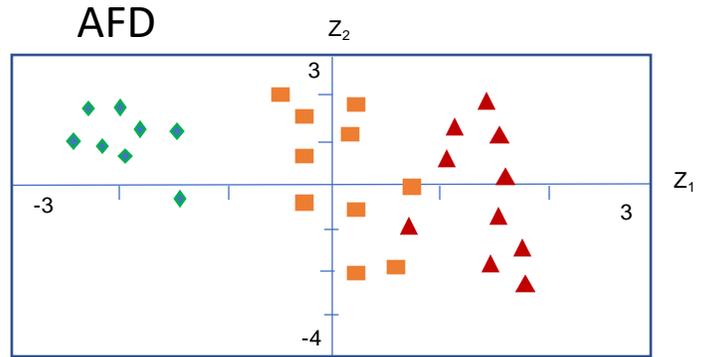
- L'intelligence artificielle constitue-t-elle la panacée promise par certains experts en mégadonnées (data scientists) ?
- Comprendre les principes de l'IA et des traitements de données s'avère indispensable pour en appréhender les capacités et limitations.

# La maintenance prédictive

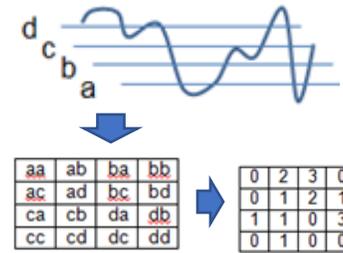


- La **discrimination** consiste à discerner et distinguer les éléments les uns des autres afin de pouvoir les séparer ou les regrouper.
  - La **segmentation** ou partitionnement (data clustering) cherche à découvrir des groupes et des structures similaires au sein des données.
  - La **classification** consiste à ranger des données nouvelles dans les différents segments ou clusters identifiés.
- Ces opérations peuvent se réaliser avec une capacité d'apprentissage par :
  - des traitements statistiques (AFD, ACP)
  - un arbre de décision
  - le calcul d'une signature caractéristique servant à établir une distance entre les éléments (indicateur statistique, calcul symbolique, réseau de neurones, etc.)

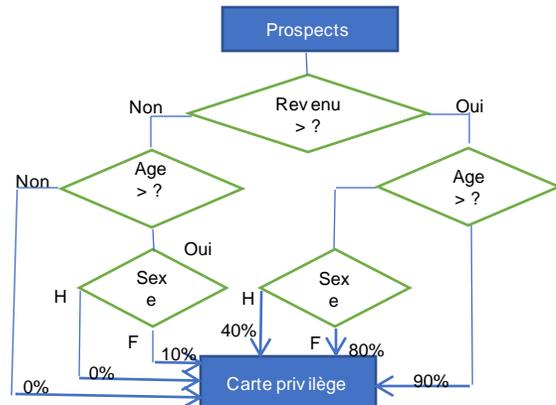
# La maintenance prédictive



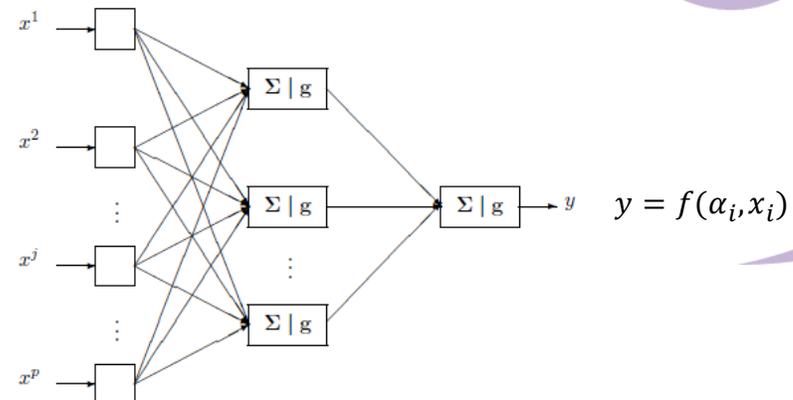
Calcul symbolique SAX



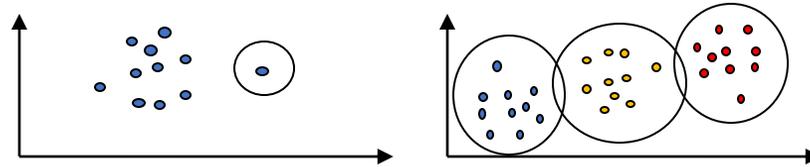
Arbre de décision



Réseau de neurones (perceptron multicouche)

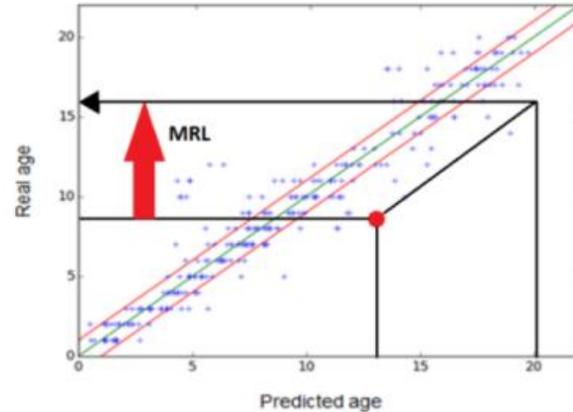


# La maintenance prédictive



- Les techniques de fouille de données et d'apprentissage permettent d'améliorer significativement le diagnostic en sachant détecter des signaux faibles ou évaluer des états de dégradation.
- De multiples données peuvent être comparées dans des fenêtres temporelles successives (pouvant se chevaucher) ou entre des zones particulières d'intérêt (phases ou modes de fonctionnement).

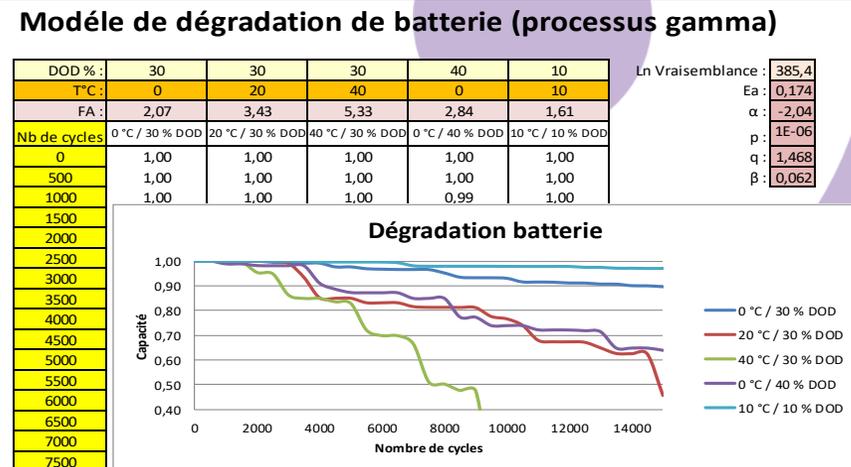
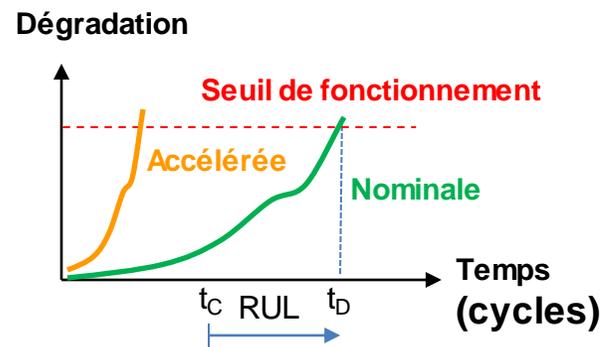
# La maintenance prédictive



- L'apport de l'I.A. s'avère plus limité en ce qui concerne le pronostic qui requiert un apprentissage de tous les comportements opérationnels dans toutes les conditions d'utilisation et d'environnement.
- La maintenance prédictive ne peut donc se suffire de l'intelligence artificielle que pour des produits peu sophistiqués fonctionnant dans des conditions stables ou des systèmes complexes dotés d'un long retour d'expérience opérationnel dans un marché de masse.

# La maintenance prédictive

- Le pronostic peut également résulter de lois de dégradation non stationnaires accélérées, fondées sur des processus de Lévy.
- Le choix d'un seuil de fonctionnement permet alors d'obtenir un modèle de fiabilité en ligne qui peut être élaboré dès la fin de conception des produits par des essais accélérés, puis enrichi en opération.



# La maintenance prédictive

- La maintenance prédictive modifie en profondeur la conception même des produits.
  - A titre d'exemple, la fiabilisation d'un drone peut faire appel à une très large palette de solutions alliant redondance, sécurisation, Health Monitoring et maintenance prédictive pour :
    - ne pas occasionner de dommages aux personnes et aux biens en cas de chute au sol,
    - éviter la collision avec d'autres usagers de l'espace aérien.
  - De même que les techniques classiques de fabrication aéronautique se révèlent inappropriées en terme de performance des machines, la multiplication des redondances alourdit inutilement les architectures, consomme de l'énergie et diminue la disponibilité opérationnelle en augmentant d'autant les risques de défaillance.

# La maintenance prédictive

- L'ouvrage vulgarise les fondements théoriques de la maintenance prédictive, dont ceux de l'intelligence artificielle, des modèles d'accélération et des processus de dégradation, stationnaires ou non.
- Il couvre le Health Monitoring qui ne se limite pas à la maintenance prédictive mais concerne tous les types de décision pouvant bénéficier d'une connaissance accrue de l'état de santé d'un système et de son évolution future.
- Il propose un guide d'application pratique fondé sur l'exploitation de l'information disponible, plus que sur l'ajout de divers capteurs.
- Il complète différents ouvrages des mêmes auteurs, dont « La fiabilité aujourd'hui », une encyclopédie de la Sûreté de Fonctionnement et de l'optimisation des systèmes.

# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

**RÉSUMÉ** : *La maintenance prédictive, ou prévisionnelle, constitue le Graal des opérateurs de systèmes car elle améliore la disponibilité et la sécurité, réduit les coûts d'exploitation et diminue la consommation de ressources et la production de déchets. Mais sa quête est difficile et ne peut se fonder sur l'intelligence artificielle que pour des produits simples ou dotés d'un long retour d'expérience dans un marché de masse. Elle implique l'emploi d'un modèle prédictif capable de décrire les comportements dans diverses conditions de dégradation, d'environnement et d'utilisation (température, vibration, humidité, sollicitation...) afin d'élaborer un pronostic à partir de l'état courant.*

*Aussi, est-il paru opportun de rassembler dans un même ouvrage la maintenance prédictive et les essais accélérés qui utilisent un tel modèle pour démontrer la capacité des produits à réaliser leur mission. Ce livre vulgarise leurs fondements théoriques, dont ceux de l'intelligence artificielle, des modèles d'accélération et des processus de dégradation, stationnaires ou non. Il propose un guide d'application pratique fondé sur l'exploitation de l'information disponible, plus que sur l'ajout de divers capteurs, et complète différents ouvrages des mêmes auteurs, dont « La fiabilité aujourd'hui », une encyclopédie de la Sûreté de Fonctionnement et de l'optimisation des systèmes.*

# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

<b>Table des matières</b>	
<b>Avant-propos.....</b>	<b>7</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>2. Fondements théoriques.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Rappel de probabilité et statistique.....</b>	<b>15</b>
2.1.1. Probabilité et opérations logiques.....	15
2.1.2. Théorème des probabilités totales et théorème de Bayes.....	16
2.1.3. Variable aléatoire.....	18
2.1.4. Principales caractéristiques de la fiabilité.....	19
2.1.4.1. Fiabilité.....	20
2.1.4.2. Durée de vie.....	20
2.1.4.3. Taux de défaillance.....	21
2.1.5. Modèle non paramétrique (Kaplan Meier).....	23
2.1.6. Lois de probabilité.....	24
2.1.6.1. Loi exponentielle.....	24
2.1.6.2. Loi de Weibull.....	24
2.1.6.3. Loi normale (Laplace-Gauss).....	26
2.1.6.4. Loi log-normale (Galton).....	26
2.1.6.5. Loi Binomiale.....	26
2.1.6.6. Loi de Poisson.....	27
2.1.7. Estimation.....	27
2.1.7.1. Intervalle de confiance.....	27
2.1.7.1.1. Intervalle de confiance d'une valeur moyenne.....	28
2.1.7.1.2. Intervalle de confiance d'une probabilité de défaillance.....	29
2.1.7.1.3. Intervalle de confiance d'un taux de défaillance.....	29
2.1.7.2. Ajustement.....	30
2.1.7.2.1. Maximum de vraisemblance.....	30
2.1.7.2.2. Intervalle de confiance asymptotique.....	32
2.1.7.2.3. Précision d'un ajustement.....	34
2.1.7.2.4. Adéquation et test statistique.....	35
2.1.8. Simulation de Monte-Carlo.....	37
2.1.8.1. Principe de la simulation.....	37
2.1.8.2. Simulation d'une variable aléatoire.....	38
2.1.8.3. Précision des résultats.....	39
2.1.9. Inférence bayésienne.....	40
2.1.9.1. Démarche fréquentielle et bayésienne.....	40
2.1.9.2. Lois conjuguées.....	41
2.1.9.3. Lois quelconques.....	44

2.2. Modèles de fiabilité.....	44
2.2.1. Fiabilité de composants.....	45
2.2.2. Fiabilité de blocs indépendants en série ou parallèle.....	47
2.2.3. Systèmes markoviens (sans usure).....	48
2.2.4. Systèmes non markoviens.....	50
2.3. Modèles d'accélération.....	51
2.3.1. Modèles Standard de Vie Accélérée (SVA).....	52
2.3.1.1. Lois d'accélération.....	53
2.3.1.2. Loi d'Arrhenius (thermique).....	54
2.3.1.3. Loi de Norris Landzberg (cyclage thermique).....	55
2.3.1.4. Loi de Peck (humidité).....	56
2.3.1.5. Loi de Basquin (vibration).....	56
2.3.1.6. Loi d'Eyring (thermoélectrique).....	58
2.3.1.7. E-modèle (panne de diélectrique).....	58
2.3.1.8. Modèle d'accélération lié aux rayons cosmiques.....	58
2.3.2. Lois d'accélération et mécanismes de défaillance.....	59
2.3.3. Prise en compte de stress variables (principe de Sedyakin).....	61
2.3.4. Autres modèles d'accélération.....	62
2.3.5. Ajustement d'un modèle de fiabilité accéléré.....	63
2.4. Modèle de dégradation.....	65
2.4.1. Processus de Levy.....	66
2.4.1.1. Processus Gamma.....	68
2.4.1.2. Processus de Wiener.....	68
2.4.1.3. Processus de Poisson composé.....	69
2.4.1.4. Processus Variance gamma.....	69
2.4.2. Loi de premier franchissement d'un seuil.....	71
2.4.2.1. Dépassement d'un seuil par un processus Gamma.....	71
2.4.2.2. Dépassement d'un seuil par un processus de Wiener.....	71
2.4.2.3. Dépassement d'un seuil par un processus Variance Gamma.....	72
2.4.3. Traitement sous Excel.....	72
2.4.3.1. Simulation de Monte-Carlo.....	72
2.4.3.2. Densité de probabilité.....	73
2.4.3.3. Ajustement.....	74
2.4.4. Cas d'application.....	75
2.4.4.1. Dégradation monotone.....	75
2.4.4.2. Dégradation bruitée.....	77
2.4.4.3. Dégradation non monotone.....	78
3. Essais accélérés.....	81
3.1. Les différents types d'essais.....	81
3.1.1. Essais accélérés.....	82
3.1.2. Essais aggravés (HALT).....	82
3.1.3. Essais de déverminage (HASS).....	83
3.1.4. Essais d'endurance.....	83
3.1.5. Essais de fiabilité.....	83

# Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive

3.2. Conditions d'essais.....	83
3.2.1. Testabilité des produits.....	84
3.2.2. Conditions d'accélération des essais.....	85
3.3. Mise en œuvre des essais accélérés.....	86
3.3.1. Questions préalables à se poser avant les essais.....	86
3.3.2. Du composant au produit.....	87
3.3.3. Du profil de vie aux conditions d'essais.....	88
3.3.4. Processus de mise en œuvre.....	90
3.3.4.1. En l'absence de phénomène d'usure.....	91
3.3.4.2. En présence de phénomène d'usure.....	92
3.3.4.3. Avec des facteurs d'accélération inconnus.....	93
3.3.5. Stratégies d'évolution des stress en essais.....	94
3.3.6. Exploitation de données hétérogènes.....	95
3.3.6.1. Cas d'un modèle de fiabilité.....	95
3.3.6.2. Cas d'un modèle de dégradation.....	96
3.3.7. Démonstration de la tenue d'un objectif de fiabilité.....	98
3.3.7.1. Cartes électroniques.....	99
3.3.7.2. Equipements mécaniques.....	102
3.3.7.3. Prise en compte d'une connaissance a priori.....	103
3.4. Dimensionnement optimal des essais.....	105
3.4.1. Dimensionnement avant essais.....	106
3.4.2. Planification durant les essais.....	108
3.4.2.1. D-Optimalité.....	109
3.4.2.2. Méthode Caboum.....	111
3.4.2.3. Distribution homogène des conditions d'essais.....	113
3.4.2.4. Optimisation globale d'une campagne d'essais.....	114
3.5. Système mono coup.....	115
3.5.1. Traitement des résultats d'essais.....	115
3.5.2. Planification des essais monocoups.....	116
3.5.2.1. Méthode One-shot.....	116
3.5.2.2. Méthode Bruceton.....	117
3.5.2.3. Méthode des Probits.....	117
3.5.2.4. Méthode Neyer.....	117
3.5.2.5. Méthode Caboum.....	118
3.5.3. Méthode des essais durcis.....	119
4. Maintenance prédictive.....	123
4.1. Maintenance prédictive et Health Monitoring.....	123
4.1.1. Maintenance corrective.....	124
4.1.2. Maintenance curative.....	124
4.1.3. Maintenance palliative.....	124
4.1.4. Maintenance préventive.....	124
4.1.5. Maintenance prévisionnelle ou prédictive.....	125
4.1.6. Health Monitoring.....	125

4.2. Traitement de données.....	127
4.2.1. Fusion de données.....	127
4.2.2. Exploration de données.....	127
4.2.2.1. Arbre de décision.....	130
4.2.2.2. Réseaux de neurones.....	131
4.2.2.3. Réseaux bayésiens.....	132
4.2.3. Apprentissage automatique.....	133
4.3. Concepts et méthodes.....	134
4.3.1. Health Monitoring et prise de décision.....	135
4.3.2. Diagnostic.....	136
4.3.3. Pronostic.....	138
4.3.3.1. Evaluation du potentiel restant.....	138
4.3.3.2. Fiabilité en ligne d'un système.....	141
4.3.4. Démarche de mise en œuvre.....	142
4.3.4.1. Démarche.....	142
4.3.4.2. Exemple d'application.....	143
4.3.5. Evaluation de la qualité d'un pronostic.....	145
5. Conclusion.....	147
Bibliographie.....	149
Table des illustrations.....	154

# Prochain ouvrage :

## Conception optimale déterministe et probabiliste

**Objectif :** Parfaire la réponse aux besoins en décloisonnant les différents métiers

**Parution :** 1 juillet 2022

**ISBN :** 979-10-97287-14-6



# Conception optimale déterministe et probabiliste

**RÉSUMÉ :** *S'il apparaît nécessaire de concilier les besoins de la Sûreté de Fonctionnement (SdF) et du Soutien Logistique Intégré (SLI), le cloisonnement en différents métiers nuit gravement à l'optimisation des systèmes en phase de conception. Ainsi, 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 pour un certain niveau de performances.*

*Recouvrant la qualité opérationnelle attendue, ces caractéristiques doivent évidemment intégrer toutes les techniques susceptibles de les améliorer dont notamment 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 l'optimisation globale des systèmes est encore loin d'être atteinte dans les bureaux d'études où la première solution trouvée est souvent celle qui est finalement retenue, après quelques ajustements.*

*L'optimisation n'est pourtant pas l'apanage de mathématiciens de haut vol et doit être effectuée par les concepteurs, eux-mêmes, s'ils veulent assurer la pérennité de leur activité face à la concurrence et répondre aux exigences environnementales et sociétales en termes de réduction de déchets, ressources consommées, efficacité énergétique et réponse au juste besoin, auxquelles il n'est plus possible de se soustraire.*

# Conception optimale déterministe et probabiliste

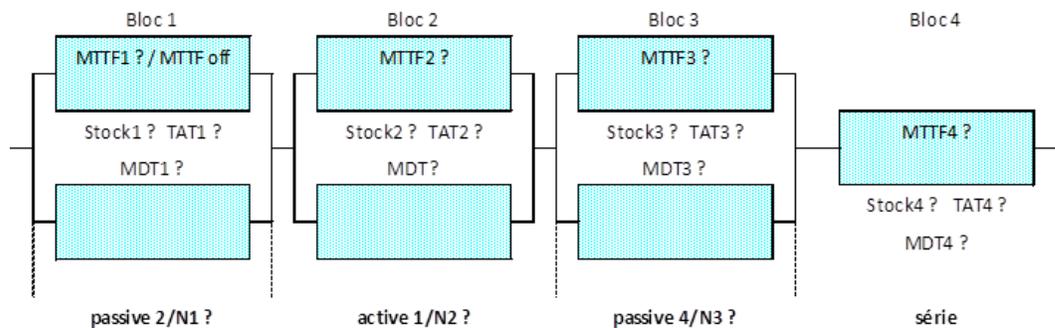
*L'optimisation peut être réalisée au moyen d'outils génériques, relativement faciles d'emploi, et se fonder sur des méthodes d'optimisation hybride capables de trouver des solutions difficiles à imaginer car situées au-delà du voisinage des solutions connues.*

*L'optimisation peut porter sur un dimensionnement déterministe, s'appuyant sur des hypothèses et normes plus ou moins conservatives (coefficient de sécurité par exemple), ou sur une approche probabiliste susceptible de réduire les marges tout en maîtrisant les dispersions (tolérance, dérive, condition environnementale, mission, etc.). Cet ouvrage présente les enjeux de la conception optimale, déterministe et probabiliste, et cherche à en vulgariser les fondements théoriques à travers des cas d'application recouvrant divers métiers.*

# Applications



+ 30 % d'élongation apportée  
par l'optimisation hybride



ELEMENTS	MTT F ON (heure)	Nb	Type de redondance	MTT F 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	3838		passive 2/3	115079		50	102		2	502		0,9883	113180
Bloc 2	2938		active 1/3				408		3	525		0,9883	100884
Bloc 3	4479		passive 4/8				162		3	510		0,9883	150889
Bloc 4	8709		série				101		1	871		0,8755	83887
ENSEMBLE												448200	
Objectif: $\geq$												0,92	

Couplage SdF / SLI

### SIMULATEUR DE CONSTELLATIONS DE SATELLITES

Initialisation Pas à pas Simulation

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

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

SAT 1	Usure	1,3837	1,3786
	Défaillance	10,226	10,221
	Satellite	1	1,3837

SAT 2	Usure		
	Défaillance		
	Satellite	0	0

SAT 3	Usure	0,5631	0,558
	Défaillance	2,1038	2,0987
	Satellite	1	0,5631

SAT 4	Usure	1,1771	1,172
	Défaillance	9,0734	9,0683
	Satellite	1	1,1771

SAT 5	Usure	0,5353	0,5302
	Défaillance	1,297	1,2919
	Satellite	1	0,5353

SAT 6	Usure	0,7137	0,7086
	Défaillance	5,2687	5,2636
	Satellite	1	0,7137

SAT 7	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

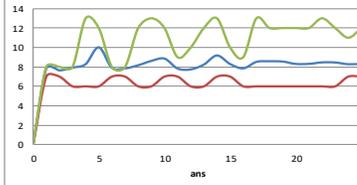
#### PARAMETRES LANCEUR

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 :

#### Nombre de satellites opérationne



	moyenne	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 nominale (1 à 20 ans)	0,98	0,01

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