



NRTW 2025



National Reliability Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

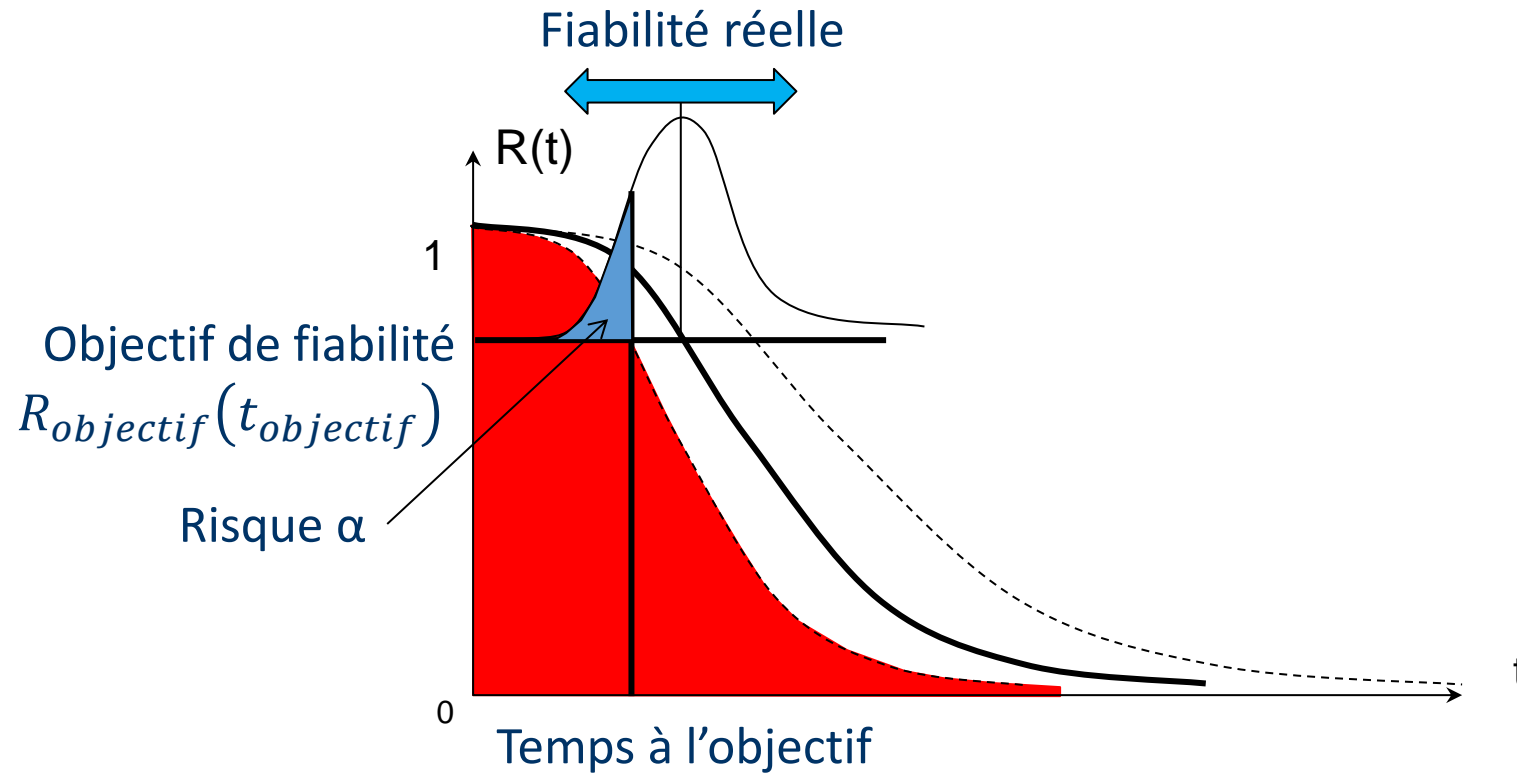
Exploitation du retour d'expérience pour l'optimisation de plans d'essais accélérés de fiabilité

Laurent Saintis, Maître de conférences, LARIS, Polytech Angers, Université d'Angers

Organisé par :

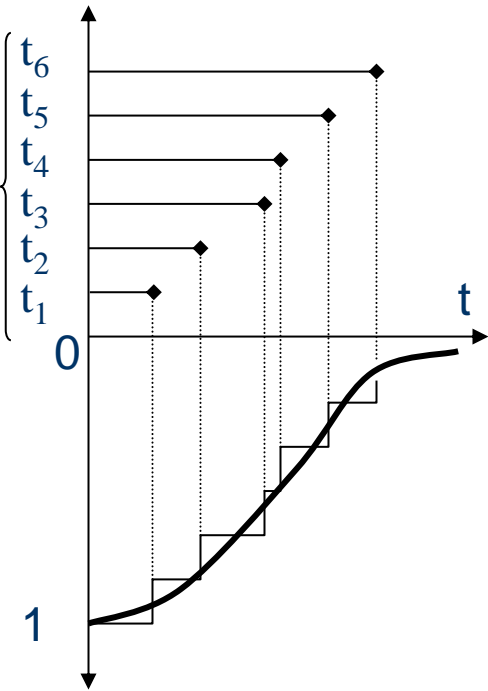
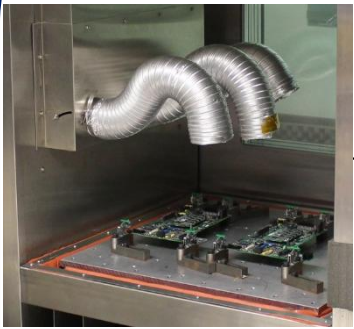


Exigence de fiabilité

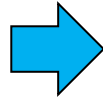


Plan de qualification

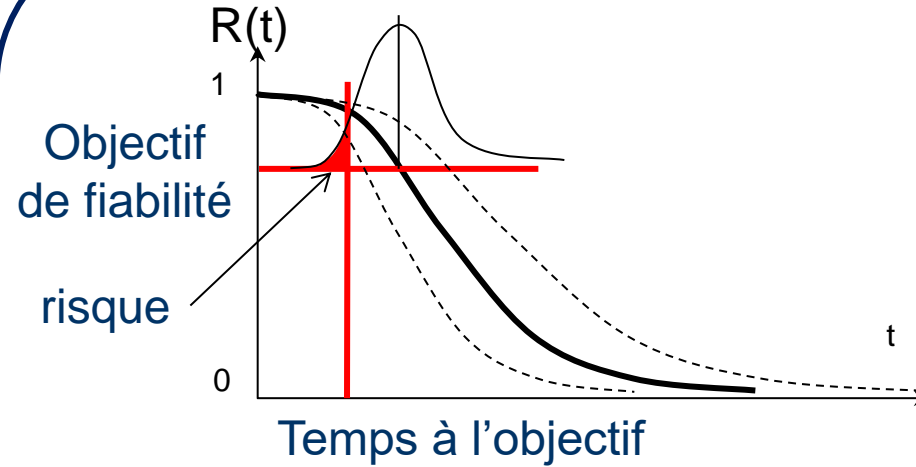
Réalisation d'un essai



Fiabilité $R(t)$

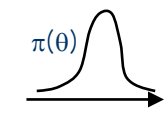


Critère de qualification

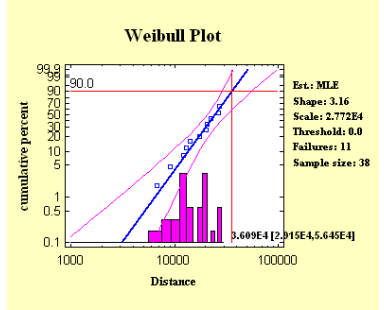


$$\Pr \left(R_{\text{estimé}}(t_{\text{objectif}}) \leq R_{\text{objectif}}(t_{\text{objectif}}) \right) \leq \alpha \rightarrow \text{qualification}$$

$$\Pr \left(R_{\text{estimé}}(t_{\text{objectif}}) \leq R_{\text{objectif}}(t_{\text{objectif}}) \right) > \alpha \rightarrow \text{refus}$$

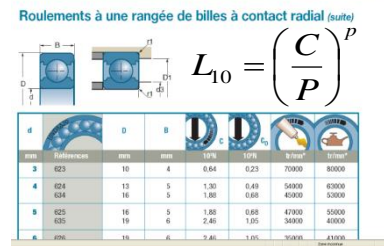


Données garanties, essais...

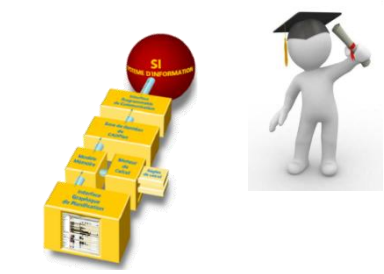


Banque de données de fiabilité

SNS Roulements à une rangée de billes à contact radial

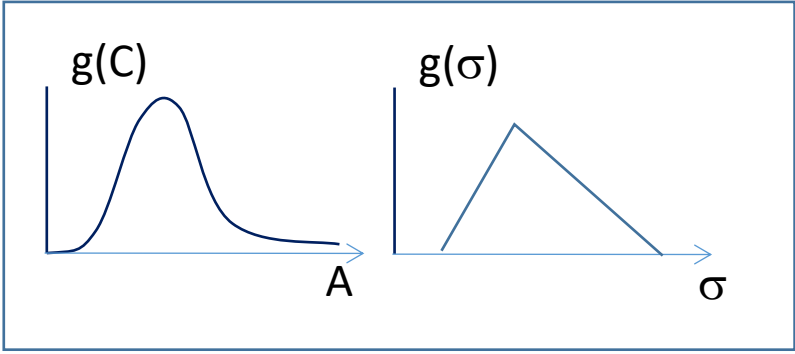


Expertise

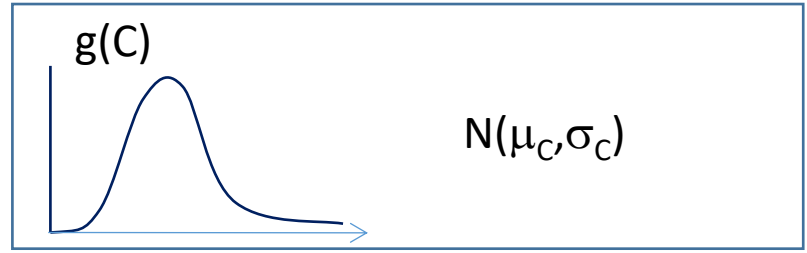


Information a priori

Choix d'un a priori (lois conjuguées...)



Distribution a priori des paramètres



analyse prévisionnelle (AMDEC, FMMEA...)

Mécanismes de défaillance, facteurs de stress et lois d'accélération

Environmental factor	Failure mechanism	Failure mode
Thermal stress	Solder crack	Drift; Open circuit
	Electrode separation	Drift; Open circuit

Information a priori niveau système



10 membranes en essais accélérés



14 compliance en essais accélérés



6 pompes en vieillissement

Membrane



Motopompe



10 es



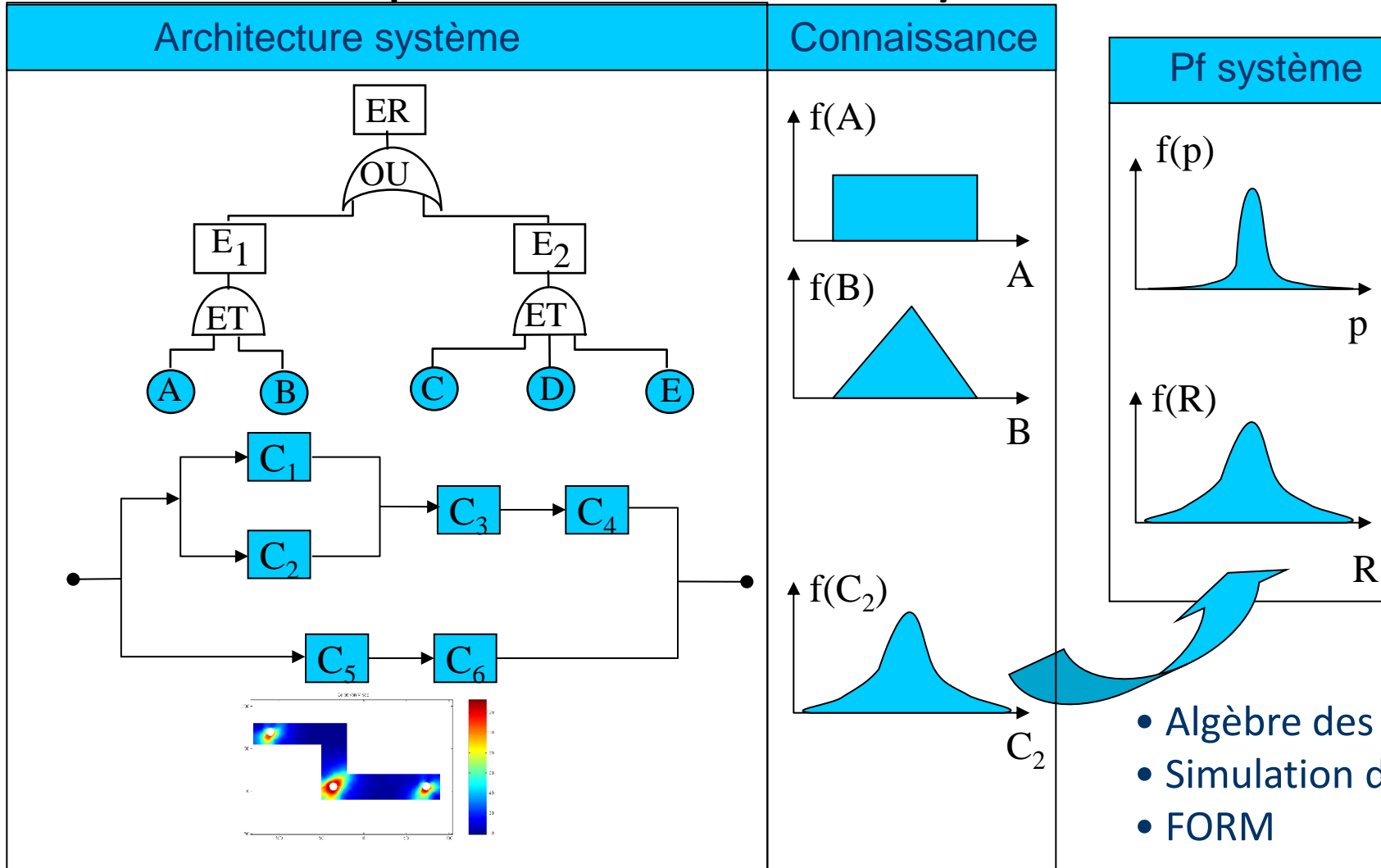
Cable



Capteurs de pression



Information a priori niveau système



Essai bayésien : principe

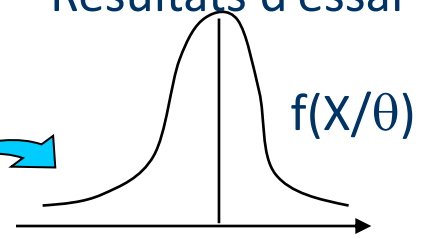
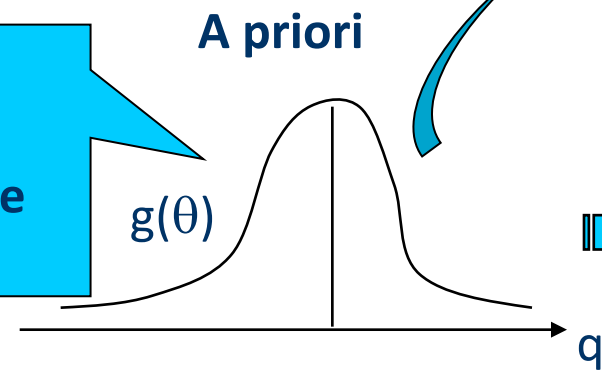
Compatibilité entre l'a priori et vraisemblance

Vraisemblance Résultats d'essai

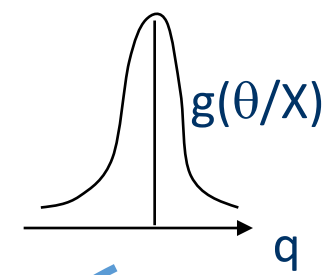
Connaissance disponible

Capitalisation de la connaissance A posteriori

définition par :
• Avis d'expert
• Architecture du système
• Modélisation

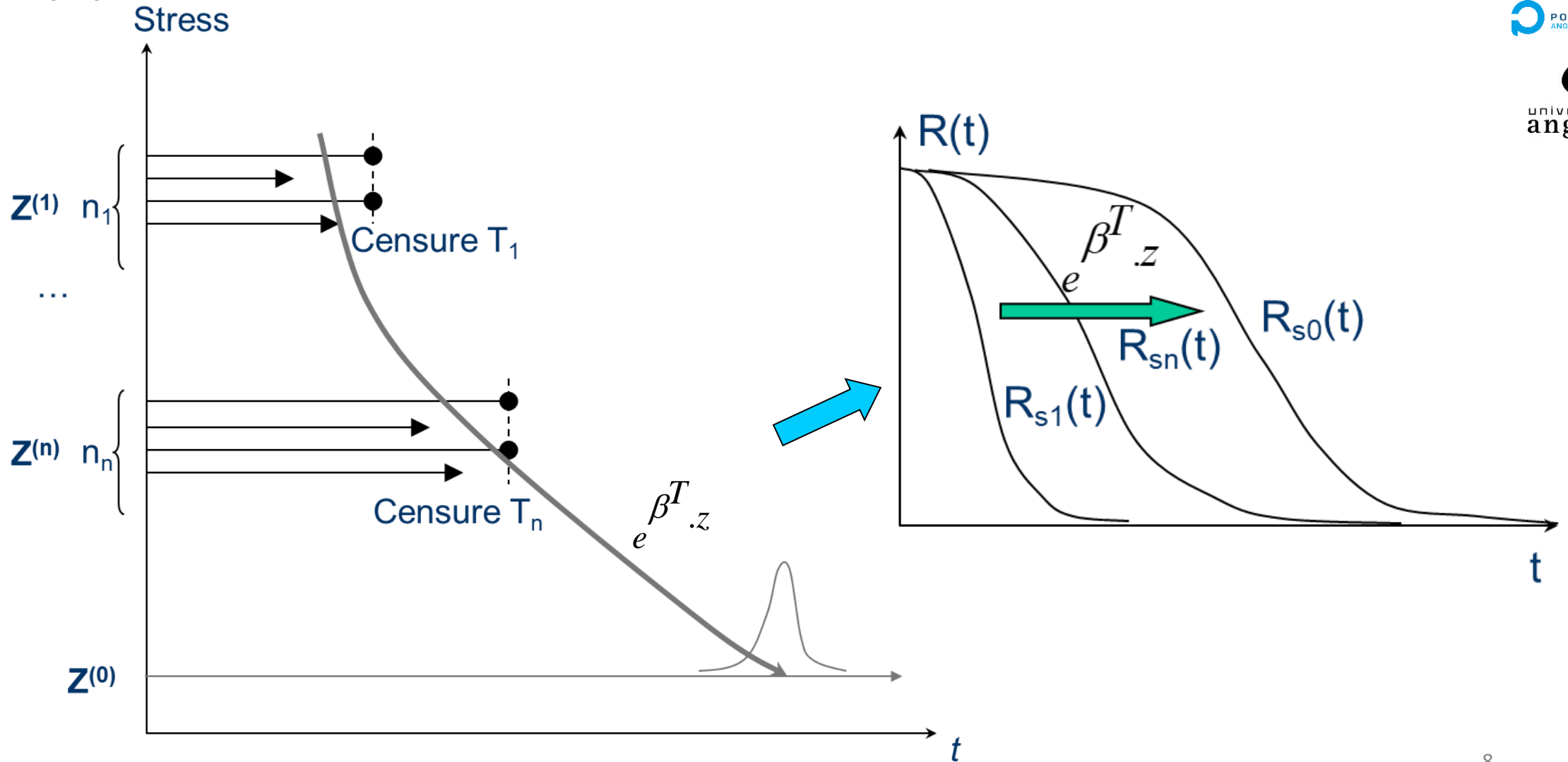


Théorème de Bayes



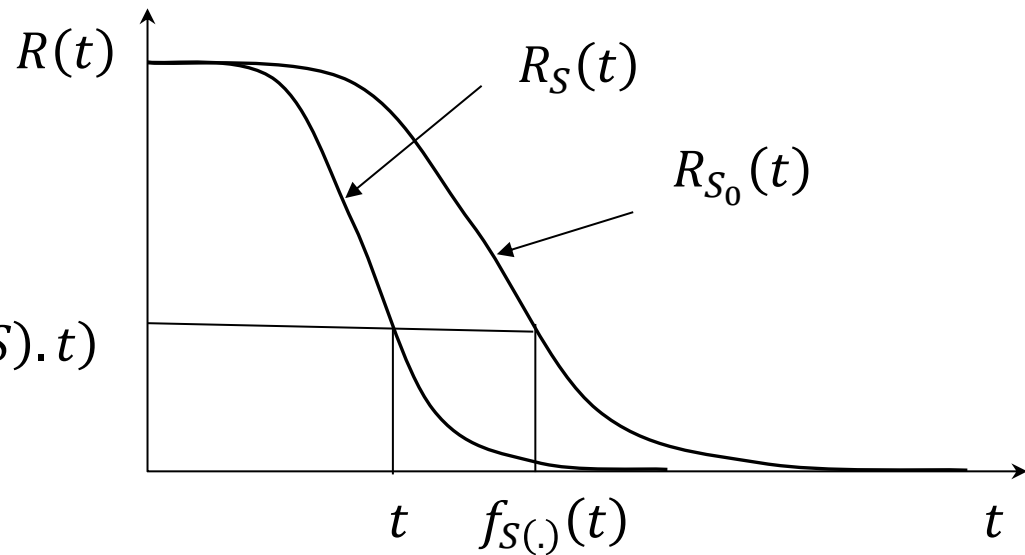
$$g(\theta/X) = \frac{f(X/\theta) \cdot g(\theta)}{\int_{D(\theta)} f(X/\theta) \cdot g(\theta) \cdot d\theta}$$

Rappel sur les essais accélérés de fiabilité



Modèle Standard de durée de vie accéléré

Considérons des produits soumis à des stress constants $s = \{s_1, \dots, s_n\}$



$$R_S(t) = R_{S_0} \left(f_{S(.)}(t) \right) = R_{S_0} (r(S) \cdot t)$$

Fonction de transfert : $f_{S(.)}(t) = r(S) \cdot t$

Facteur d'échelle ou d'accélération

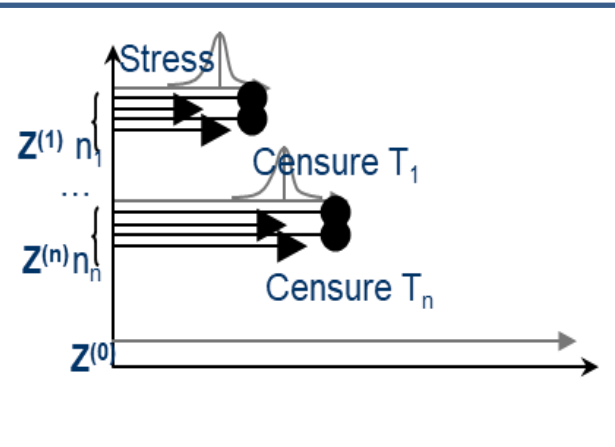
$$r(s) = e^{\beta z}$$

Modèle d'Arrhénius
 $r(T) = e^{\beta_0 + \frac{\beta_1}{T}}$

Modèle puissance inverse
 $r(V) = e^{\beta_0 + \beta_1 \ln(V)}$

Exploitation du retour d'expérience pour l'optimisation de plans d'essais accélérés de fiabilité

Estimation MLE



- Vraisemblance :

$$L(X | \gamma, \sigma) = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{n_i} \left[\frac{1}{\sigma} \left(\frac{T_{ij} - \gamma^T z^i}{\sigma} \right) \right]^{\delta_i} R \left(\frac{T_{ij} - \gamma^T z^i}{\sigma} \right)$$
- Estimation par MLE :

$$(\hat{\gamma}, \hat{\sigma}) = \text{Argmax}(L(\gamma, \sigma))$$

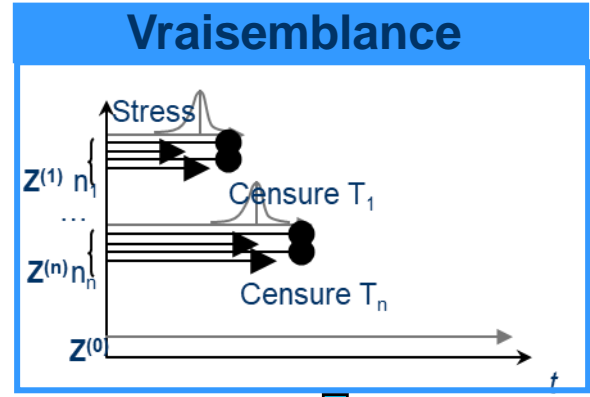
Estimation bayésienne

Connaissance disponible

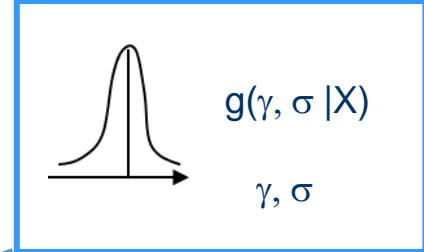
$g(\gamma, \sigma)$

γ, σ

A screenshot of a software interface titled 'Roulements à une rangée de billes à contact radial'. It shows a table with columns for parameters like 'n', 'D', 'd', 'B', 'C', 'L', 'E', 'G', 'H', 'I', 'J', 'K', 'L', 'M', 'N', 'O', 'P', 'Q', 'R', 'S', 'T', 'U', 'V', 'W', 'X', 'Y', 'Z'. The table contains numerical values for various parameters.



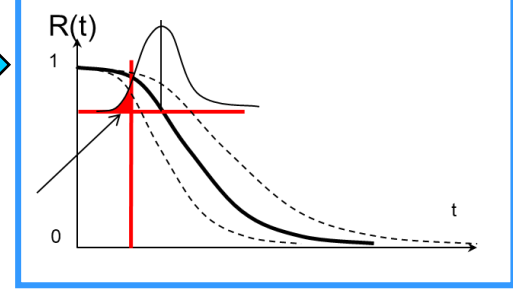
Capitalisation de la connaissance



Théorème de Bayes

$$g(\gamma, \sigma | X) = \frac{L(X | \gamma, \sigma) \cdot g(\gamma, \sigma)}{\int_{D(\gamma, \sigma)} L(X | \gamma, \sigma) \cdot g(\gamma, \sigma) \cdot d\gamma d\sigma}$$

Estimation de l'objectif de fiabilité



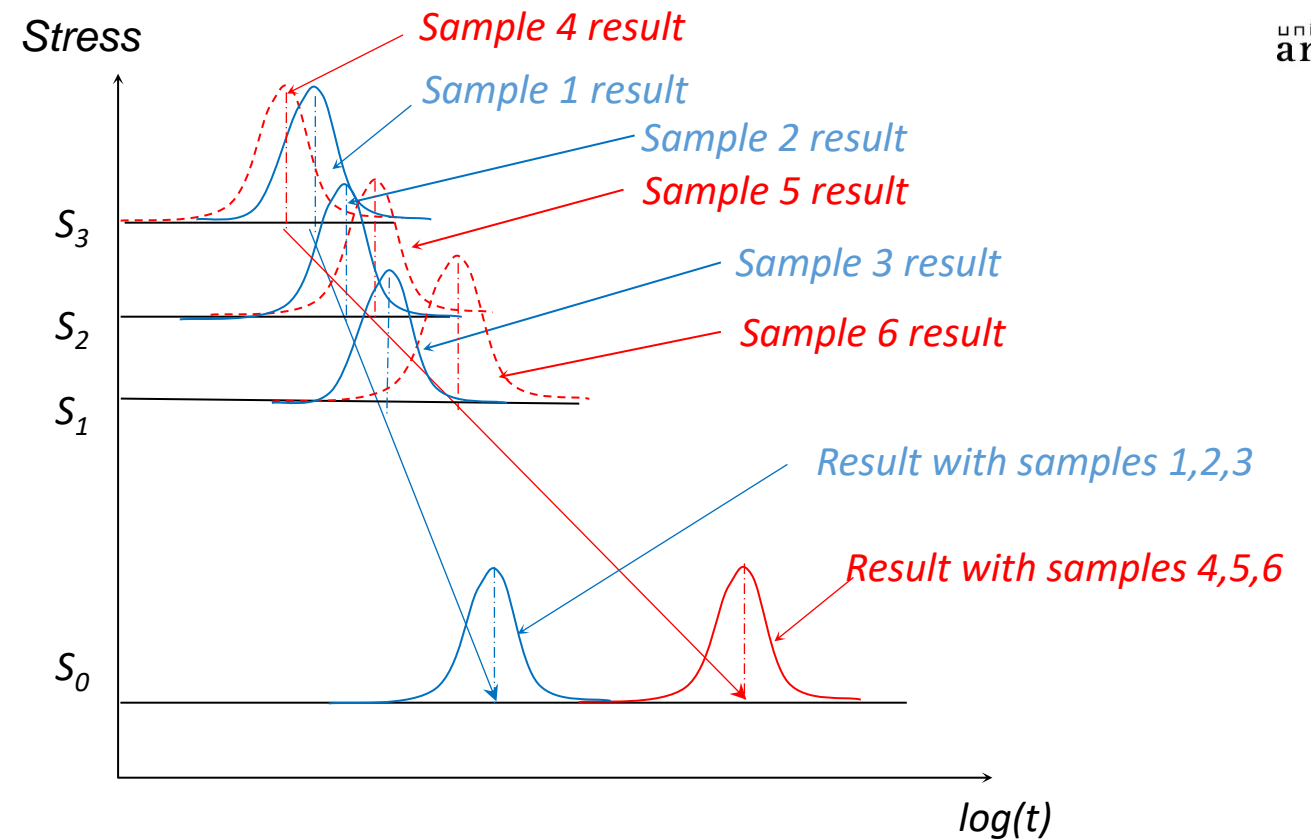
Qualification

Intérêt des essais accélérés de qualification :

- Estimation des performances de fiabilité dans les conditions opérationnelles
- Réduire les temps d'essais

Contraintes des essais accélérés de qualification :

Forte propagation de l'incertitude dans les conditions nominales avec peu d'unités testées



Hypothèses pour l'optimisation d'un plan d'essai accéléré

- Les mécanismes de défaillances provoqués doivent être représentatifs des conditions nominales
- Lois d'accélération connues associées aux mécanismes de défaillance
- Caractérisation des lois de fiabilité et des paramètres associés

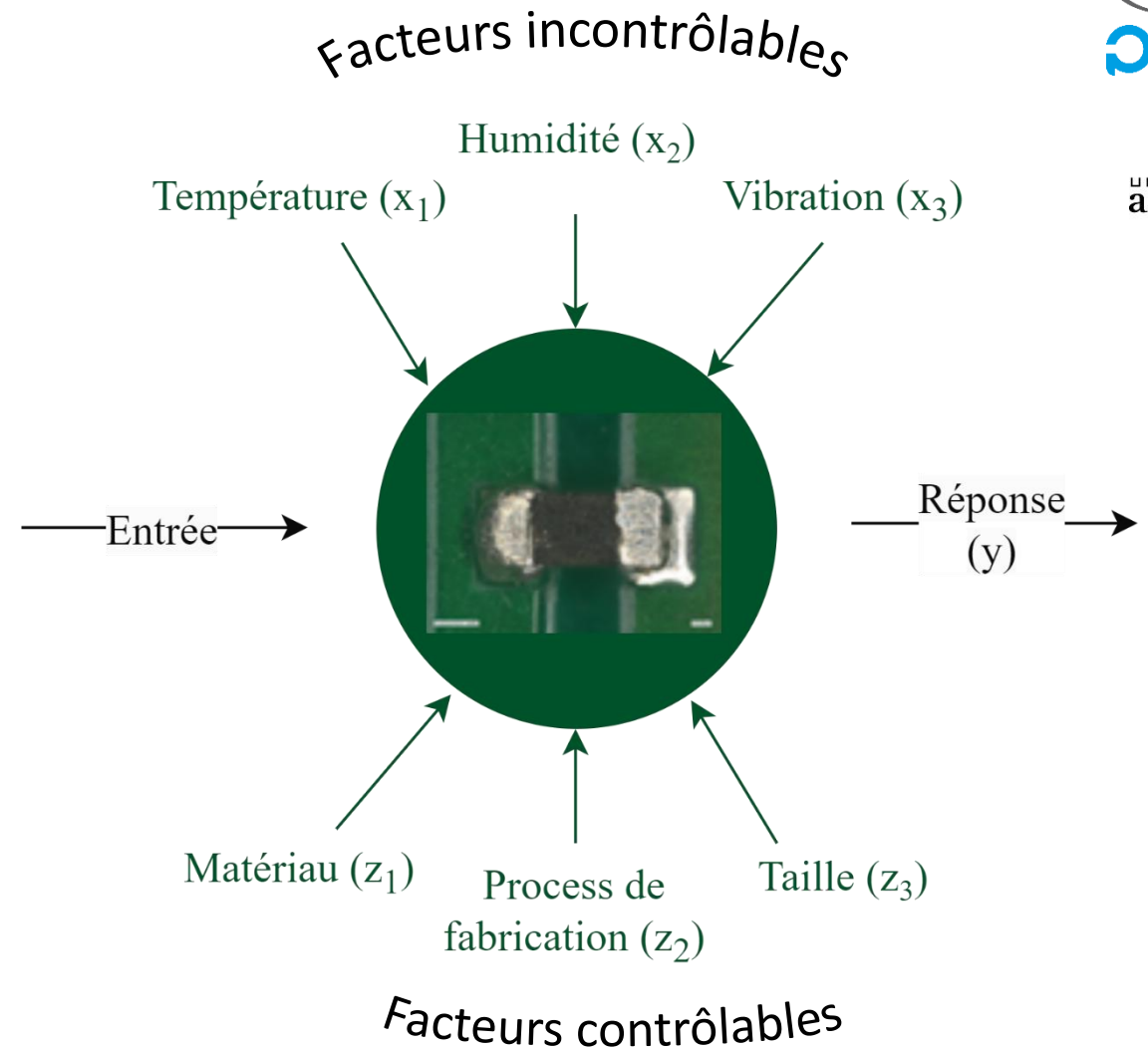


Plans d'expérience

- Définition d'un plan d'essais accélérés suivant plusieurs facteurs de stress

Plan Hypercube Latin

Voltage ratio (V)	0	0,4	0,8	1,2	1,6
Humidité (%)	75	85	30	0	60
Température (°C)	30	85	60	120	10



Optimisation du plan d'expérience

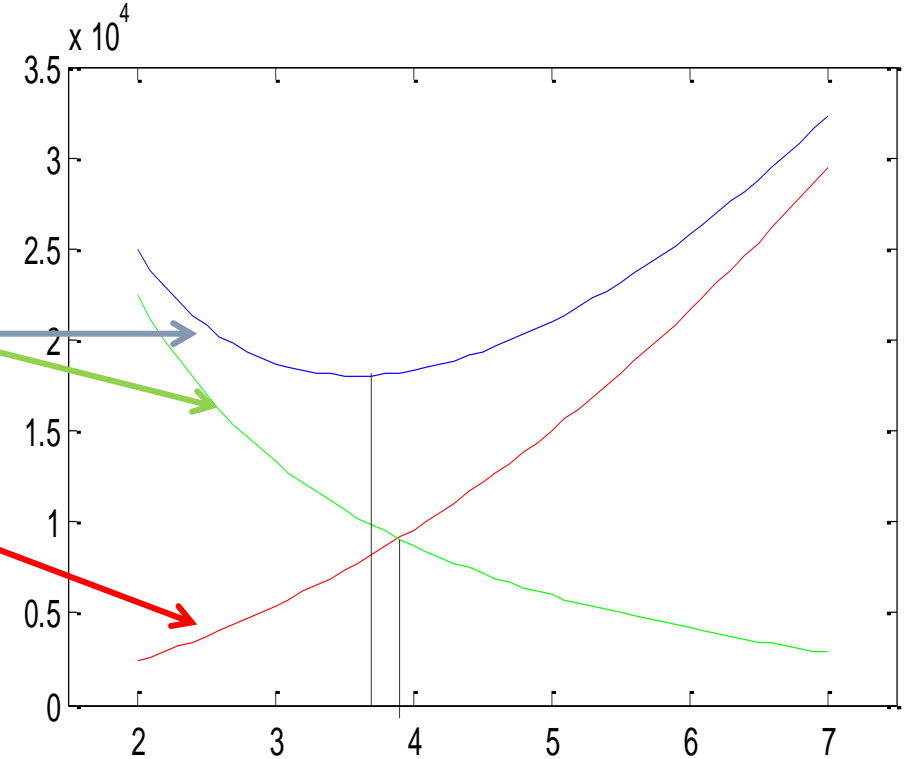
Fisher information

$$I^{MAP}(\sigma, \gamma_i) = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \gamma_1^2} & -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \gamma_1 \partial \gamma_2} & \dots & -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \gamma_1 \partial \sigma} \\ -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \gamma_2 \partial \gamma_1} & -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \gamma_2^2} & \dots & -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \gamma_2 \partial \sigma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \sigma \partial \gamma_1} & -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \sigma \partial \gamma_2} & \dots & -\frac{\partial^2 \ln[\pi_{post}(\sigma, \gamma|\mathbb{T})]}{\partial \sigma^2} \end{bmatrix}_{|\gamma, \sigma}$$

- D-optimalité : minimiser la variance généralisée des estimateurs des paramètres $\det(I^{MAP}(\sigma, \gamma_i)^{-1})$
- C-optimalité : minimiser la variance d'un estimateur d'une quantité d'intérêt dans les conditions d'utilisation $E(Avar(R_{S_0}(T_{obj})))$
- A-optimalité : minimiser la variance moyenne des estimateurs de paramètres $\text{trace}(I^{MAP}(\sigma, \gamma_i)^{-1})$
- G-optimalité : minimiser la variance maximale des valeurs prédites
- **V-optimalité : minimiser la variance moyenne des valeurs prédites $E(Avar(T_{obj}))$**

Généralisation de l'optimum avec la définition d'une fonction de coût

$$C_{\text{Global}} = C_{\text{essai}} + C_{\text{opération}}$$



$C_{\text{opération}}$ = Coût fixe de garantie

+ $(P_{\text{opération}} - P_{\text{objectif}}) \times$ Taille de la population \times Coût d'une unité

+ Coût de perte d'image. $(P_{\text{opération}} - P_{\text{objectif}})^{\gamma_{\text{opération}}}$

Méthodologie

Definition de l'objectif de fiabilité m_α

Ex: $R(t_R)$ pour un risque α

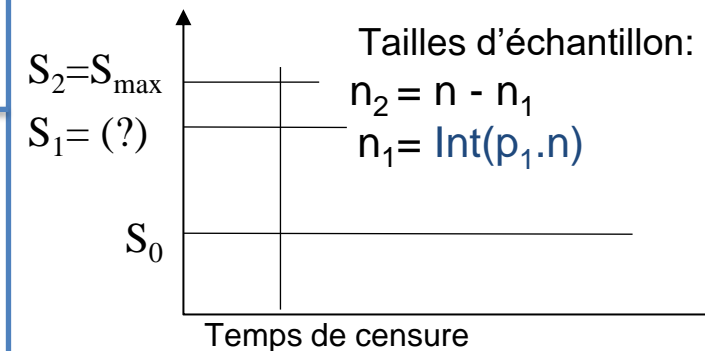
Choix du modèle $R\left(\frac{T - \hat{\gamma}Z_0}{\hat{\sigma}}\right)$

Connaissance disponible

Opinion d'experts, données sur des versions antérieures, ... (γ, σ, \dots)
Définition de $\Pi(\gamma)$ et $\Pi(\sigma)$

Plan de test $P(\omega)$ à optimiser

ω : paramètres du plan

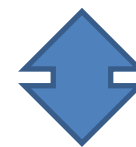


Procédure d'optimisation et analysis de robustesse

1- Procédure d'optimisation

Rechercher les paramètres de plan ω tels que :

Minimize $\text{Coût global}(\omega, x) = \text{Coût d'essai}(\omega, x) + \text{Coût d'exploitation}(\omega, x)$




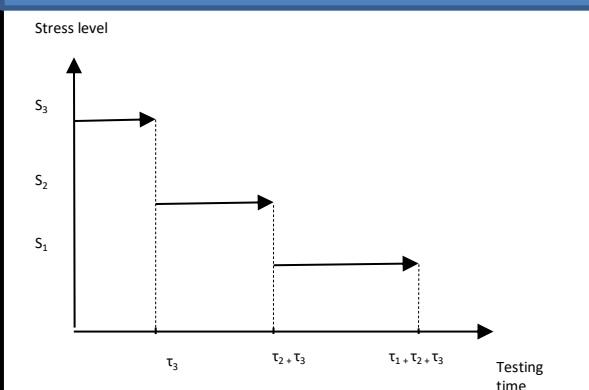



Analyse conjointe

2- Analyse de robustesse

Détermination de m_α par sa borne unilatérale supérieure pour risque fixé en explorant l'espace $\Pi(\gamma)$ and $\Pi(\sigma)$

Exploitation du retour d'expérience pour l'optimisation de plans d'essais accélérés de fiabilité

Exemple :
module
électronique
de contrôle
de pompe

Caractéristiques		Relationship		
 <p>Loi d'accélération: Arrhenius</p> <p>Température ° Nominal 45°C, Max :110°C</p> <p>Fonction de fiabilité</p> $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{1.5}}$	α	Paramètre d'échelle	$\alpha = \exp(\mu)$	
	μ	Paramètre de localisation	$\mu = \gamma_0 + \gamma_1 S$	
	S	Stress transformé		
	ζ_i	Stress normé S_i	$\zeta_i = \frac{(S_i - S_3)}{(S_0 - S_3)}$	
Plan d'essai	Echantillon (n = 50)	T °C	Temps de censure	Métrique
 <p>Stress level</p> <p>Testing time</p> <p>τ_3 $\tau_2 + \tau_3$ $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3$</p>	$n_1 = 34$	74.5°	1080 h	<p>Pf à 150 h</p> <p>P_{cible} = 10⁻²</p>
	$n_2 = 5$	89°	600 h	
	$n_3 = 11$	105°	380 h	
Paramètre de localisation (A priori cohérent et peu informatif)		Paramètre de forme (A priori cohérent et très informatif)		
$\gamma_{0 \min} = -31.7$ $\gamma_{0 \min} = -11.7$  N(-21.7, 1.7)		$\gamma_{1 \min} = 7500$ $\gamma_{1 \min} = 12460$  N(9980, 413.3)		$\beta_{\min} = 1.3$ $\beta_{\max} = 1.7$  N(1.5, 0.03)

Conclusion

- Méthode avec une généralisation à de plans d'essais avec stress multiples
- Amélioration de la robustesse de l'estimation de fiabilité
- Utilisation des données d'essais précédentes pour la conduite d'un essai séquentiel
- Précautions :
 - Algorithme d'optimisation à prendre en compte car le temps de calcul peut être long en fonction du nombre de simulation
 - Choix de l'a priori pour les paramètres des lois qui peut être informatif ou pseudo non-informatif

Perspectives de recherche

- Plan d'essais avec des facteurs de conception
- Plan d'expérience produit avec prise en compte de l'inférence bayésienne

Plan Taguchi

Plan Hypercube Latin

Facteurs contrôlables					Facteurs incontrôlables					
DOE N°	Facteur A	Facteur B	Facteur C	Facteur D	ALT N°	1	2	3	4	5
1	A1	B1	C2	D1	Ratio de tension (V)	0	0,4	0,8	1,2	1,6
2	A1	B1	C2	D2	Humidité (%)	75	85	30	0	60
3	A1	B2	C2	D1	Température (°C)	30	85	60	120	10
4	A1	B2	C2	D2	Réponses					
					Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	
					Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{25}	
					Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}	
					Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	

- Modélisation de la relation entre les facteurs contrôlables et la réponse.
- Etudier les interactions entre les composants au niveau système
- Identifier les facteurs significatifs.
- Étudier la robustesse.

$$Y_{jk} = (Y_{jk1}, Y_{jk2}, \dots, Y_{jkN})$$

N : taille d'échantillon

Quelques références

- [1] F. Guérin, B. Dumon, et E. Usureau, « Reliability estimation by Bayesian method: definition of prior distribution using dependability study », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 82, n° 3, p. 299-306, déc. 2003, doi: [10.1016/j.ress.2003.07.002](https://doi.org/10.1016/j.ress.2003.07.002).
- [2] « Statistique des essais accélérés , Hermès / lavoisier, Méthodes stochastiques appliquées: Unitheque.com : Vincent COUALLIER, Léo GERVILLE-RÉACHE, Mikhail NIKULIN: 9782746215344 Livre ».
- [3] G. Yang, *Life Cycle Reliability Engineering*. Wiley, 2007.
- [4] E. A. Elsayed et H. Zhang, « Design of optimum reliability test plans under multiple stresses », *QUALITA 2005, Quality and Dependability*, p. 16-18, 2005.
- [5] Y. Zhang et W. Q. Meeker, « Bayesian Methods for Planning Accelerated Life Tests », *Technometrics*, vol. 48, n° 1, p. 49-60, févr. 2006, doi: [10.1198/004017005000000373](https://doi.org/10.1198/004017005000000373).
- [6] S. Z. Fatemi, F. Guerin, et L. Saintis, « Development of optimal accelerated test plan », in *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings - Annual*, janv. 2012, p. 1-6. doi: [10.1109/RAMS.2012.6175462](https://doi.org/10.1109/RAMS.2012.6175462).
- [7] S. Z. Fatemi, L. Saintis, et F. Guerin, « Optimal accelerated test plan: optimization procedure using Genetic Algorithm », in *4th International Conference on Accelerated Life Testing and Degradation*, Rennes, France, 06 - 06/06 2012.
- [8] S. Z. Fatemi, « Planification des essais accélérés : optimisation, robustesse et analyse », phdthesis, Université d'Angers, 2012. Consulté le: 4 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01004379>
- [9] S. Z. Fatemi, F. Guérin, et L. Saintis, « Accelerated Life Testing : Analysis and Optimization », in *QUALITA2013*, Compiègne, France, mars 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00823171>

NRTW 2025

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

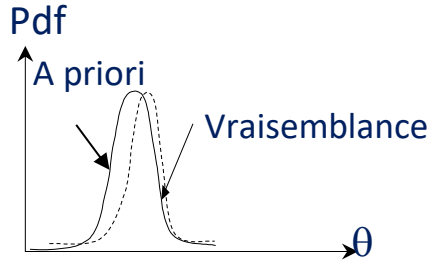
merci pour votre écoute !

Organisé par :

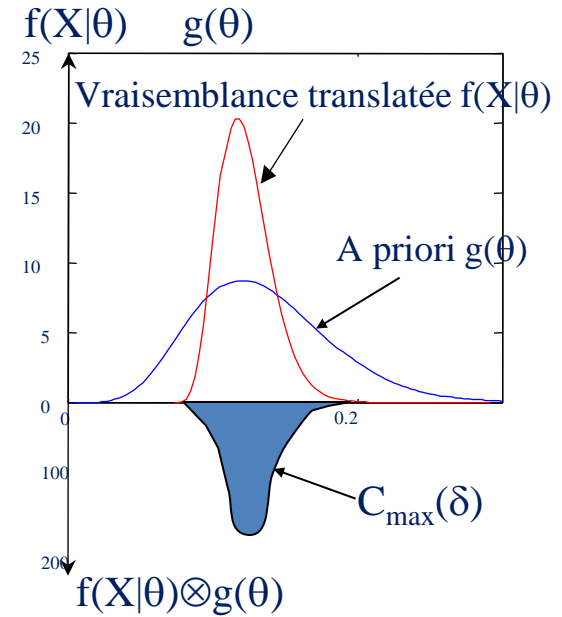
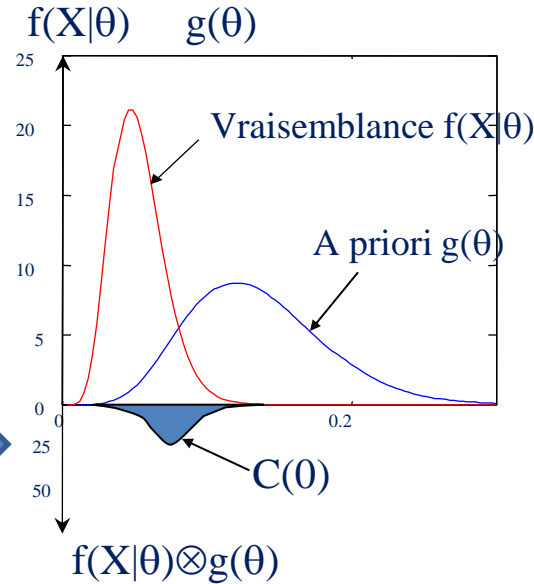
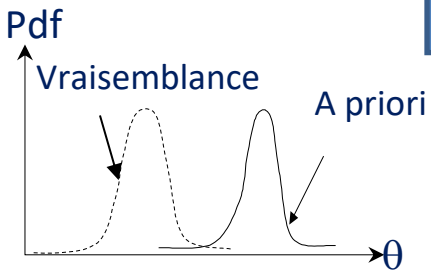


Compatibilité de l'a priori avec les résultats d'essai

A priori cohérent



A priori incohérent



Pondération de l'a priori

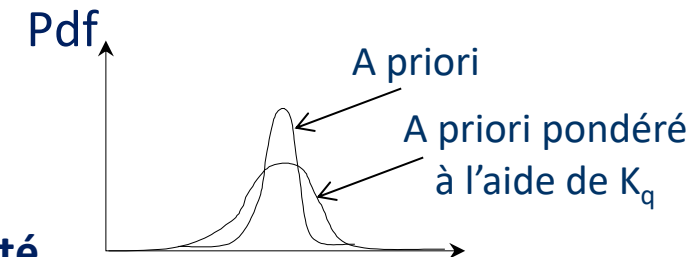
$$K_{\theta} = \frac{C(0)}{C_{\max}(\delta)}$$



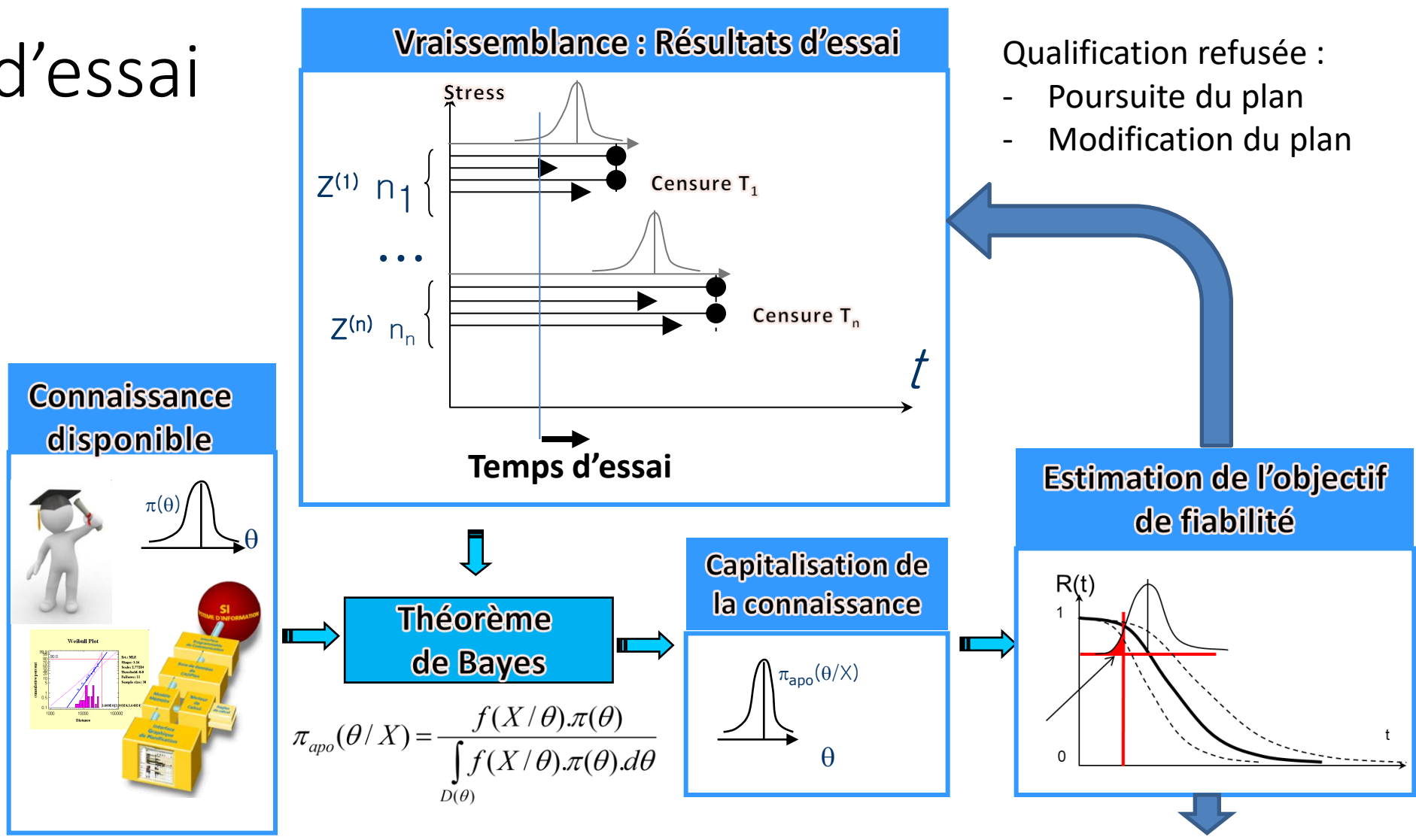
K=1 Bonne compatibilité

↑ Degré de compatibilité

K=0 Mauvaise compatibilité



Conduite d'essai



Test séquentiel du critère de qualification

Test d'hypothèses

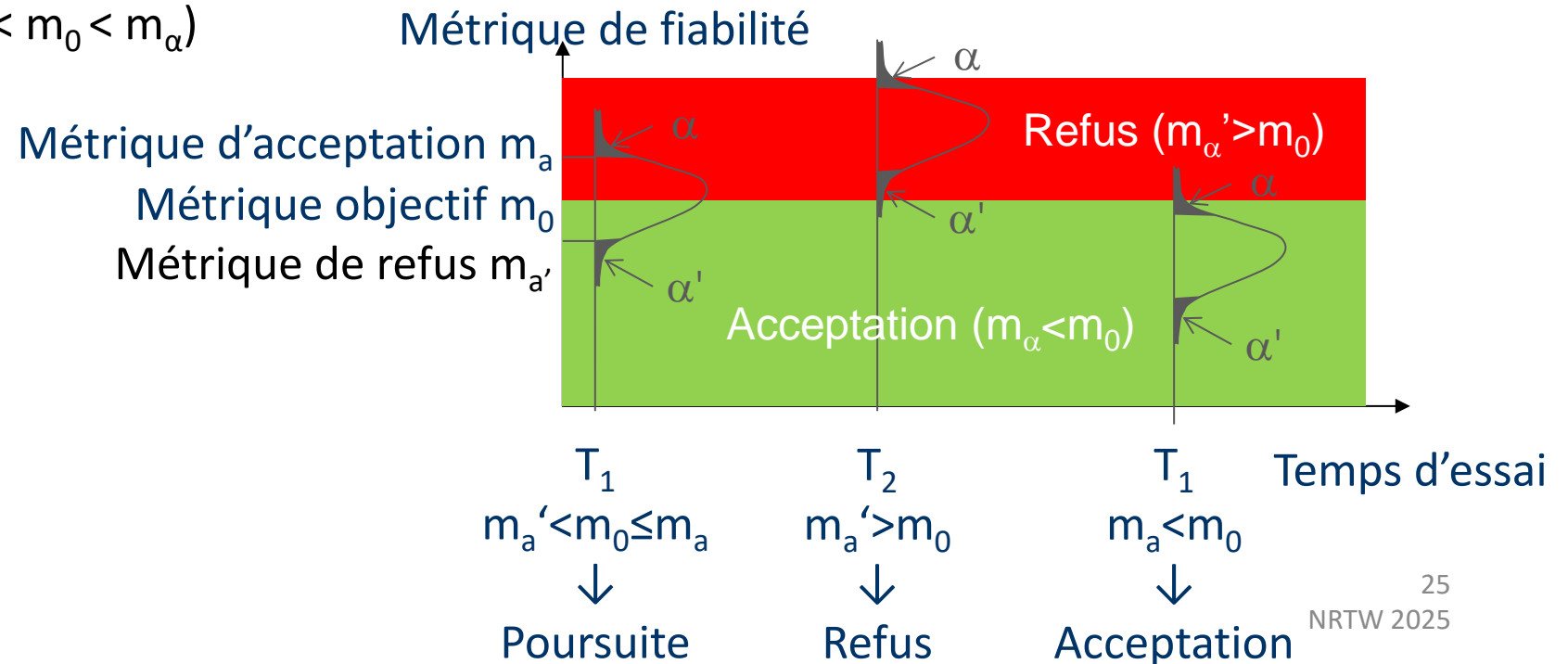
$$H_0: m_0 > m_\alpha$$

$$H_1: m_0 < m_{\alpha'}$$

A chaque instant t_n d'analyse, on définit :

- La région d'acceptation si $m_0 > m_\alpha$
- La région de refus si $m_0 < m_{\alpha'}$
- et la poursuite de l'essai ($m_{\alpha'} < m_0 < m_\alpha$)

Conduite des essais accélérés



Exploitation du retour d'expérience pour l'optimisation de plans d'essais accélérés de fiabilité

Exemple de conduite d'essai

