

ANNEXE GENERALE CLIMATIQUE

TOME 3

DETERMINATION DE L'ENVIRONNEMENT A SIMULER

SOMMAIRE

<u>1. INTRODUCTION</u>	<u>5</u>
<u>1.1 Cas de défaillances par contraintes extrêmes</u>	<u>5</u>
<u>1.2 Cas de défaillances par dommages cumulés</u>	<u>5</u>
<u>2. MODELES DE DEGRADATION</u>	<u>7</u>
<u>2.1 Dégradation purement thermique</u>	<u>7</u>
<u>2.2 Dégradation sous l'effet d'une association de contraintes</u>	<u>9</u>
<u>2.3 Dégradation thermomécanique</u>	<u>11</u>
<u>2.4 Dégradation non thermo-activée</u>	<u>13</u>
<u>2.5 Paramètres de modèles de vieillissement</u>	<u>14</u>
<u>2.6 Échelle d'utilisation des modèles de dégradation</u>	<u>16</u>
<u>2.7 Exemples d'application de modèles de dégradation</u>	<u>19</u>
2.7.1 Fiabilité d'un dispositif électronique soumis à des températures extrêmes	19
2.7.2 Durée de vie d'un propergol	21
2.7.3 Vieillessement thermique d'un matériel	23
<u>2.8 Les écarts entre la réalité et les prévisions</u>	<u>25</u>
<u>3. SPECTRES DE REPONSE EXTREME ET SPECTRE DE DOMMAGE PAR FATIGUE</u>	<u>27</u>
<u>3.1 Comparaison de spécifications</u>	<u>27</u>
<u>3.2 Modèle étalon (ou de référence)</u>	<u>28</u>
<u>3.3 Critères de sévérité</u>	<u>29</u>
<u>3.4 Spectre de réponse extrême thermique</u>	<u>29</u>
<u>3.5 Spectre de dommage par fatigue</u>	<u>30</u>
<u>3.6 Réaction chimique thermiquement activée</u>	<u>31</u>
<u>3.7 Ecart entre la réalité et les hypothèses sur les modèles retenus</u>	<u>34</u>

<u>3.8</u>	<u>Etablissement de l'environnement à simuler</u>	<u>35</u>
3.8.1	Traitement de chaque évènement	35
3.8.2	Critères de regroupement des évènements d'une situation ou synthèse de plusieurs situations	36
3.8.3	Synthèse des évènements d'une situation	36
3.8.4	Synthèses de plusieurs situations	37
3.8.5	Réduction et validation de la durée des essais	39
<u>3.9</u>	<u>Applications</u>	<u>40</u>
3.9.1	Comparaison des modes opératoires 1 et 2 de la norme GAM EG13, 1ère partie. Variations de température – Fascicule 6 (juin 1989)	40
3.9.2	Réduction de la durée à nombre de cycles constant	41
3.9.3	Elaboration d'une spécification d'essai	41
<u>4.</u>	<u>PRISE EN COMPTE DES VARIABILITES</u>	<u>43</u>
<u>4.1</u>	<u>La variabilité des caractéristiques de l'environnement</u>	<u>43</u>
<u>4.2</u>	<u>La variabilité des caractéristiques climatiques des matériels</u>	<u>45</u>
<u>4.3</u>	<u>Coefficient de garantie</u>	<u>46</u>
4.3.1	Conditions d'application de la méthode de calcul du coefficient de garantie	49
4.3.2	Choix de l'unité des températures	50
4.3.3	Modalités de détermination du coefficient de garantie	52
<u>5.</u>	<u>ESTIMATION DU COEFFICIENT DE VARIATION ASSOCIE A UNE TEMPERATURE EXTREME MAXIMALE</u>	<u>53</u>
<u>5.1</u>	<u>Contexte</u>	<u>53</u>
<u>5.2</u>	<u>Problématique</u>	<u>53</u>
<u>5.3</u>	<u>Contexte déterministe</u>	<u>53</u>
<u>5.4</u>	<u>Contexte statistique</u>	<u>54</u>
5.4.1	Utilisation des quantiles extrêmes	54
5.4.2	Reconstitution de la distribution extrême	54
<u>5.5</u>	<u>CONCLUSIONS</u>	<u>58</u>

<u>6.</u>	<u>METHODES DE SYNTHESE</u>	<u>59</u>
6.1.1	Méthode basée sur les distributions de températures.	59
6.1.2	Guides CEI 60721-3 pour le choix des essais d'environnement climatiques	61
6.1.3	Méthode basée sur les configurations fonctionnelles.	63
6.1.4	Les climatogrammes	69
6.1.4.1	Définition	69
6.1.4.2	Exemple	69
6.1.4.3	Utilisation des climatogrammes	70
6.1.4.4	Essais « valeurs refuges »	71
6.1.4.5	Exemples d'utilisation	72
6.1.4.6	Règle d'utilisation des climatogrammes	74
6.1.4.7	Conclusion	74
<u>7.</u>	<u>RECOMMANDATIONS SUR LE CHOIX DES VALEURS DES PARAMETRES</u>	<u>75</u>
<u>7.1</u>	<u>Coefficient d'exagération</u>	<u>75</u>
7.1.1	Pour la loi d'Arrhenius	75
7.1.2	Pour les SRE et SDF	75
<u>7.2</u>	<u>Valeurs des paramètres des modèles des SRE et SDF</u>	<u>75</u>
7.2.1	Choix de la valeur b	75
7.2.2	Choix des valeurs K et C	78

1. INTRODUCTION

Cette étape consiste à rechercher un environnement simplifié réputé de même sévérité que l'ensemble des environnements de tout ou partie du profil de vie.

La démarche doit être réalisée à la fois vis-à-vis des risques de défaillances par contraintes extrêmes et vis-à-vis des risques par dommages cumulés (vieillessement)

1.1 Cas de défaillances par contraintes extrêmes

Les défaillances de ce type correspondent à la dégradation d'une fonction du matériel considéré résultant d'un franchissement de seuil d'un ou de plusieurs agents d'environnement. Il s'agit en général d'une valeur proche des valeurs maximales prises en compte lors de la conception, bien que dans certains cas particuliers la défaillance puisse se produire pour des valeurs intermédiaires.

Dans ce cas, la modélisation peut porter par exemple sur :

- l'élaboration d'un modèle par éléments finis de l'équipement et le calcul de sa réponse en température au niveau d'un matériel sensible, dans les conditions d'installation réelles et dans celles de la chambre climatique du laboratoire d'essai.
On peut alors identifier les conditions de pilotage du caisson climatique d'une part et d'installation du matériel en essai d'autre part permettant de reproduire la réponse recherchée en laboratoire (prise en compte des différences entre mécanismes d'échanges (conduction, convection et radiation) entre le laboratoire et l'emploi réel),
- le calcul d'un niveau de contrainte environnementale permettant d'assurer la probabilité de tenue visée pour le matériel. Ce calcul qui s'effectue à partir des distributions des valeurs extrêmes de cette contrainte et des résistances à cette contrainte ainsi que du nombre d'essais possibles (calcul du *CG* et du *FE*)

1.2 Cas de défaillances par dommages cumulés

La démarche du présent guide vise à disposer de matériels ayant les performances requises au cours du profil de vie spécifié. Le vieillissement du matériel doit donc être pris en compte lorsque c'est possible dans la démarche de développement, c'est-à-dire lorsque ceci est compatible avec les délais et les coûts de développement du projet, sachant que les essais de vieillissement peuvent être très longs et que l'on pourra être amené à les réaliser en parallèle avec la mise en exploitation du matériel.

Dans ce cas, la mise en évidence d'un point faible ou d'une situation à risque en fin de vie pourra conduire à une action de maintenance corrective et/ou à des modifications de conditions d'emploi.

La modélisation du vieillissement dont il est question ici porte sur les modèles utilisables au cours des différentes phases d'un programme de prise en compte de l'environnement climatique.

Ces modèles sont utilisés en vue d'atteindre deux types d'objectif :

- prévision de la durée de vie d'un matériel: la prise en compte de l'impact de l'environnement sur sa durée de vie est réalisée lors des phases de conception et de définition,
- validation expérimentale d'un matériel : le matériel est soumis à une procédure d'essais visant à accélérer des processus de dégradation de manière à engendrer l'apparition de défaillances escomptées.

En fait, il n'existe pas de séparation nette entre des modèles qui seraient spécifiques de ces deux objectifs.

Dans la plupart des cas, les modèles résultent des considérations suivantes :

- il est toujours nécessaire de disposer d'un modèle physique adéquat, c'est-à-dire compatible avec les objectifs qui lui sont assignés : compromis entre une représentativité suffisante et une complexité acceptable,
- un modèle doit être paramétrable, ce qui justifie, sauf cas particuliers de modèles totalement déterminés a priori, la réalisation d'essais d'identification paramétrique,
- toute procédure d'identification implique la mise en œuvre de méthodes statistiques permettant d'obtenir des estimations crédibles : valeur moyenne, coefficient de variation et, dans le meilleur des cas une distribution statistique.

La diversité des modèles (existants ou à développer) relatifs aux variables climatiques est telle qu'il n'est pas réaliste de prétendre à l'exhaustivité. Les quelques exemples illustratifs qui sont présentés ci-après pourront, en dépit de leur caractère spécifique, être replacés dans le contexte ci-dessus.

Un matériel peut subir des modifications de propriétés relatives à ses fonctionnalités sous l'effet d'une combinaison de contraintes climatiques. Ces modifications sont soit réversibles, soit irréversibles. Les modifications irréversibles sont généralement associées à des évolutions liées au vieillissement du matériel, vieillissement qui dépend lui-même de la durée d'exposition à l'environnement climatique.

La modélisation du vieillissement d'un matériel est une préoccupation primordiale dans le cadre de la maîtrise de sa durabilité au cours d'un profil de vie donné.

Les agents d'environnements sont multiples et ils activent un grand nombre de mécanismes de vieillissement étroitement liés au couple matériel-environnement climatique considéré. L'identification des mécanismes de vieillissement susceptibles d'intervenir au cours des différentes étapes du profil de vie du matériel est l'étape préalable à toute tentative de modélisation de son comportement dans le temps.

La validation expérimentale de chaque mécanisme de vieillissement est réalisée par des essais de vieillissement souvent accélérés (gains en coûts et en délais).

L'accélération d'un essai de vieillissement est généralement obtenue par une augmentation, par rapport aux niveaux réels du profil de vie retenu, des niveaux de contraintes des agents d'environnements influant sur le mécanisme de vieillissement considéré. Cette accélération est souvent exprimée par le Facteur d'Accélération *FA* qui peut être écrit comme le rapport :

$$FA = \frac{V_{essai}}{V_{réel}}$$

Avec :

V_{essai} : vitesse moyenne du mécanisme de vieillissement considéré dans l'environnement d'essai pour atteindre un niveau d'endommagement donné,

V_{réel} : vitesse moyenne du mécanisme de vieillissement considéré dans l'étape du profil de vie retenu pour atteindre le même niveau d'endommagement.

FA : correspond donc au rapport entre la durée réelle liée au profil de vie pour atteindre un niveau d'endommagement donné et la durée de l'essai dit accéléré pour atteindre ce même niveau d'endommagement.

2. MODELES DE DEGRADATION

2.1 Dégradation purement thermique

La température est un facteur qui influence la plupart des mécanismes de vieillissement. La loi d'**Arrhenius** est utilisée dans de nombreux domaines pour décrire son impact sur l'endommagement d'un matériel ou d'un matériau (métaux, polymères, matériels électroniques, cartes électroniques, organes électroniques, organes électrotechniques, organes mécaniques,...). Le facteur d'accélération s'écrit alors :

$$FA_{1/2} = \exp \left[\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]$$

avec :

$FA_{1/2}$: Facteur d'accélération entre un état 1 et un état 2 ($FA_{1/2} = \frac{t_1}{t_2}$ avec t_2 la durée d'exposition dans l'état 2 provoquant les mêmes dommages qu'une exposition de t_1 dans l'état 1),
 T_1 : Température de l'état 1 (K),
 T_2 : Température de l'état 2 (K),
 E_a : Énergie d'activation (eV ou J)
 k_b : Constante de Boltzmann (eV.K⁻¹ ou J. K⁻¹) (exprimée en J. K⁻¹, la constante de Boltzmann est égale au rapport de la constante des gaz parfaits par le nombre d'Avogadro)

Nota: L'électronvolt (eV) correspond à l'énergie qu'acquiert un électron soumis à une tension électrique d'un volt (1 eV = 1,6 10⁻¹⁹ J). La constante de Boltzmann est égale à 1,38 10⁻²³ J.K⁻¹ soit 8,617 10⁻⁵ eV.K⁻¹.

Cette forme de loi a pour origine les travaux d'**Arrhenius** sur la vitesse d'inversion du saccharose dans l'eau (réaction d'ordre 1 pour laquelle la vitesse de réaction ne dépend que de la teneur de la seule espèce réactive) qui établit expérimentalement la relation suivante entre la constante de vitesse (k) de cette réaction et la température (T) [ARR-01]:

$$\ln(k) = A_1 - \frac{A_2}{T}$$

avec :

A_1 et A_2 : constantes caractéristiques de la réaction étudiée (respectivement s⁻¹ et K.s¹),
 k : constante de vitesse (s⁻¹),
 T : température (K).

Par analogie avec la relation de **Van't Hoff**, l'équation établie par **Arrhenius** peut s'écrire sous la forme [VAN-01]:

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

avec :

- A : facteur de fréquence (s^{-1}),
 E_a : énergie d'activation de la réaction étudiée ($J.mol^{-1}$)
 T : température (K),
 R : constante des gaz parfaits ($J.mol^{-1}.K^{-1}$).

Nota : Dans le domaine de la physicochimie, le rapport $\frac{-E_a}{RT}$ avec E_a en $J.mol^{-1}$ et R en

$J.mol^{-1}.K^{-1}$ est usuel alors que dans le domaine de l'électronique, le rapport $\frac{E_a}{k_b}$ avec E_a en eV et k_b en $eV.K^{-1}$ est le plus utilisé.

Suivant la **théorie de Eyring**, l'énergie d'activation est définie comme la barrière énergétique que doivent franchir les espèces réactives pour donner lieu aux produits réactionnels finaux.

Ce maximum d'énergie correspond à une configuration particulière des réactifs appelée état de transition (complexe activé). Le facteur de fréquence est lui fonction de la température et d'aspects stériques propres aux réactifs considérés (*entropie des réactifs*) [GLA-01].

Dans le cas d'une réaction d'ordre 1 (cas de la réaction d'inversion du saccharose), la vitesse de réaction est proportionnelle à la constante de vitesse et au taux d'avancement de la réaction (concentration en réactif à l'instant t). On montre alors, en associant la notion de fin de vie (t) à un taux d'avancement donné de la réaction, que :

$$t = K \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_b} \cdot T\right)$$

avec :

- E_a : Énergie d'activation (eV),
 K : une constante (s),
 k_b : Constante de Boltzmann ($eV.K^{-1}$ avec $R = k_b \cdot N_a$ avec R la constante des gaz parfaits et N_a le nombre d'Avogadro).

C'est donc en assimilant un mécanisme de dégradation thermo-activé d'un matériel à une réaction chimique d'ordre 1 que l'on justifie l'application de la loi d'**Arrhenius** pour estimer des équivalences de dommage sous l'effet de la contrainte thermique.

Prenons le cas simple d'un matériel dont la structure en matériau polymère est endommagée par une réaction de décomposition thermique d'ordre 1.

Ceci permet de mettre en évidence les difficultés liées à l'application de la loi d'Arrhenius et les précautions qui en découlent:

- **critère de fin de vie** : le critère de fin de vie d'un matériel n'est pratiquement jamais directement relié au niveau d'avancement de la réaction de dégradation. Il s'agit souvent d'un point limite associé à une grandeur (électrique, mécanique ou autre) quantifiant une dégradation à l'échelle macroscopique, au-delà duquel sa fonction ne serait plus assurée correctement dans son environnement d'exploitation. La valeur de l'énergie d'activation

doit donc être déterminée expérimentalement et elle est fonction du critère de fin de vie considéré.

- domaine de linéarité du graphe d'endurance thermique (logarithme de la durée de vie en fonction de l'inverse de la température de vieillissement) : la réaction de décomposition peut changer en fonction de la température, ce qui se traduit par un changement de pente du graphe d'endurance thermique. Il convient donc d'être particulièrement vigilant lorsque l'on exploite des résultats d'essais de vieillissement à des températures très supérieures à la température maximale d'utilisation du matériel.
- complexité de la cinétique de vieillissement: dans la pratique, le vieillissement thermique est souvent associé à de multiples réactions d'ordres supérieurs à 1 qui interviennent successivement et/ou simultanément. De plus, des phénomènes de diffusion d'espèces réactives (par exemple, de l'oxygène pour une réaction de thermo-oxydation) depuis la surface vers l'intérieur du matériel interfèrent avec le mécanisme de la réaction principale. L'expression de la loi cinétique est alors plus complexe et ne conduit pas à l'obtention de la linéarité attendue du graphe d'endurance thermique.

Néanmoins, la loi d'*Arrhenius* est utilisée pour exploiter les résultats des essais de vieillissement thermique dans de nombreux domaines et pour des matériaux, produits ou matériels très variés. D'autres modèles plus ou moins empiriques y sont rattachés, utilisés pour décrire les cinétiques de mécanismes de dégradation thermo-activés, comme par exemple, [FLY-01] :

- modèle de **Berthelot** : [BER-01]:

$$t = A.exp(C.T)$$
avec t la durée de vie, A et C des constantes et T la température en °C.
Cette expression est surtout utilisée pour décrire l'évolution sous l'effet de la température de phases condensées. Bien que chronologiquement antérieure à la loi d'*Arrhenius*, elle peut être considérée comme une forme simplifiée de la loi d'*Arrhenius* dans un domaine limité de température où l'on observe une linéarité approximative entre T et $1/T$ [PIE-02]
- modèle de Williams, Landel et Ferry (WLF) :

$$t = A.exp\left(\frac{-a}{(T+b)}\right)$$
avec t la durée de vie, T la température et (A, a, b) paramètres du

modèle. Ce modèle est applicable seulement au vieillissement par mécanismes viscoélastiques (fluage et relaxation) dans lesquels la contrainte thermique intervient en association avec une contrainte mécanique liée à la mise en œuvre ou à l'utilisation (par exemple, joint élastomère exploité en compression [LEH-01])

2.2 Dégradation sous l'effet d'une association de contraintes

Les notations communes pour ce paragraphe :

E_a : Énergie d'activation,

k_b : Constante de Boltzmann

T : Température,

$FA_{1/2}$: Facteur d'accélération entre un état 1 et un état 2 ($FA_{1/2} = \frac{t_1}{t_2}$ avec t_2 : durée d'exposition dans l'état 2 provoquant les mêmes dommages qu'une exposition de t_1 dans l'état 1),

Les mécanismes de dégradation sont très souvent fonction d'une association de contraintes environnementales de natures différentes (mécaniques, électriques, chimiques, ...). Les difficultés d'élaboration d'un modèle de dégradation adapté sont alors très importantes. **Eyring** a proposé un modèle, présenté comme une généralisation du modèle cinétique d'**Arrhenius**, qui permet de prendre en compte l'influence de la température associée à d'autres contraintes. Pratiquement, compte tenu de la complexité des expressions d'interactions entre contraintes, le modèle d'Eyring n'est utilisé que pour prendre en compte l'effet combiné de la température (T) et d'une autre contrainte (humidité, contrainte électrique, contrainte mécanique, radiation,...). La cinétique de dégradation s'exprime alors par :

$$v = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k_b T}\right) \cdot \exp\left[f(s) \cdot \left(C + \frac{D}{k_b T}\right)\right]$$

avec :

A , C et D : constantes spécifiques,

$f(s)$: Fonction de la contrainte s

Cette structure de modèle a influencé un bon nombre de modèles semi-empiriques généralement assez simples et donc d'un emploi aisé. À titre d'exemples, on peut citer :

- Influence combinée de la température et de l'humidité :

Lors de l'apparition de composants électroniques encapsulés dans des boîtiers non métalliques imparfaitement étanches, de nombreux travaux ont porté sur leur tenue en atmosphère humide. Ces travaux ont conduit à la formulation de divers modèles :

Forme type « **PECK** » [PEC-01] :

$$FA_{1/2} = \exp\left[\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \cdot \left[\frac{HR_2}{HR_1}\right]^n$$

Forme type « **GUAN** » [GUA-01] :

$$FA_{1/2} = \exp\left[\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) + B \left(\frac{1}{HR_1} - \frac{1}{HR_2}\right)\right]$$

Forme type « **LAWSON** » [LAW-01] :

$$FA_{1/2} = \exp\left[\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) + B (HR_2 - HR_1)^n\right]$$

dans toutes ces relations interviennent:

T_1 et HR_1 : respectivement la température (K) et l'humidité relative (%) de l'état 1,

T_2 et HR_2 : respectivement la température (K) et l'humidité relative (%) de l'état 2,

n et B : les paramètres de la teneur en vapeur d'eau.

- Influence combinée de la température et de la densité de courant :

L'électro migration au sein de composants électroniques (déplacements d'atomes sous fortes densités de courant) a été décrite par le **modèle de Black** qui s'écrit [BLA-01] :

$$FA_{1/2} = \exp \left[\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{\Delta J_2}{\Delta J_1} \right)^n \right]$$

avec :

T_1 et J_1 : respectivement température (K) et densité de courant ($A.m^{-2}$) de l'état 1,

T_2 et J_2 : respectivement température (K) et densité de courant ($A.m^{-2}$) de l'état 2,

n : paramètre de la densité de courant.

- Influence combinée de la température et de la tension d'alimentation :

Le vieillissement en température et sous tension de composants électroniques peut être décrit par le modèle suivant :

$$FA_{1/2} = \exp \left[\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n \right]$$

avec :

T_1 et V_1 : respectivement température (K) et tension d'alimentation (V) de l'état 1,

T_2 et V_2 : respectivement température (K) et tension d'alimentation (V) de l'état 2,

n : paramètre de la tension d'alimentation.

2.3 Dégradation thermomécanique

Les assemblages de matériaux à coefficients de dilatation distincts exposés à des cycles thermiques peuvent se dégrader par fatigue mécanique (contraintes mécaniques engendrées par dilatations différentielles). Les assemblages réputés sensibles à ce mécanisme de fatigue sont par exemple :

- En électronique : les jonctions des composants de puissance, les liaisons des composants assemblés directement à la surface de la carte (CMS) sur des reports, les boîtiers de protection d'organes électroniques de puissance...
- Les fils chauffants de résistances électriques,
- ...

Le modèle de base associé à la fatigue thermomécanique est basé sur l'équation de **Coffin & Manson** [COF-01, MAN-01]:

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2 \varepsilon'} \right)^{\frac{1}{c}}$$

avec :

N_f : Nombre de cycles à rupture

ε' : Coefficient de ductilité en fatigue

c : exposant de ductilité en fatigue

$\Delta \varepsilon_p$: Amplitude de la déformation plastique

Cette relation correspond à la fatigue oligocyclique (à faible nombre de cycles) dans le cas où les déformations plastiques sont prépondérantes (fluage négligeable). En considérant les déformations plastiques proportionnelles aux écarts de température des cycles thermiques, le facteur d'accélération issue de la loi de **Coffin & Manson** s'écrit :

$$FA_{1/2} = \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^n$$

avec :

$FA_{1/2}$: Facteur d'accélération entre le cycle thermique 1 et le cycle thermique 2

($FA_{1/2} = \frac{N_1}{N_2}$ avec N_2 nombre de cycles 2 provoquant les mêmes dommages que N_1 cycles 1),

ΔT_1 et ΔT_2 : différence entre température haute et température basse respectivement des cycles thermiques 1 et 2,

n : paramètre de la sensibilité thermomécanique.

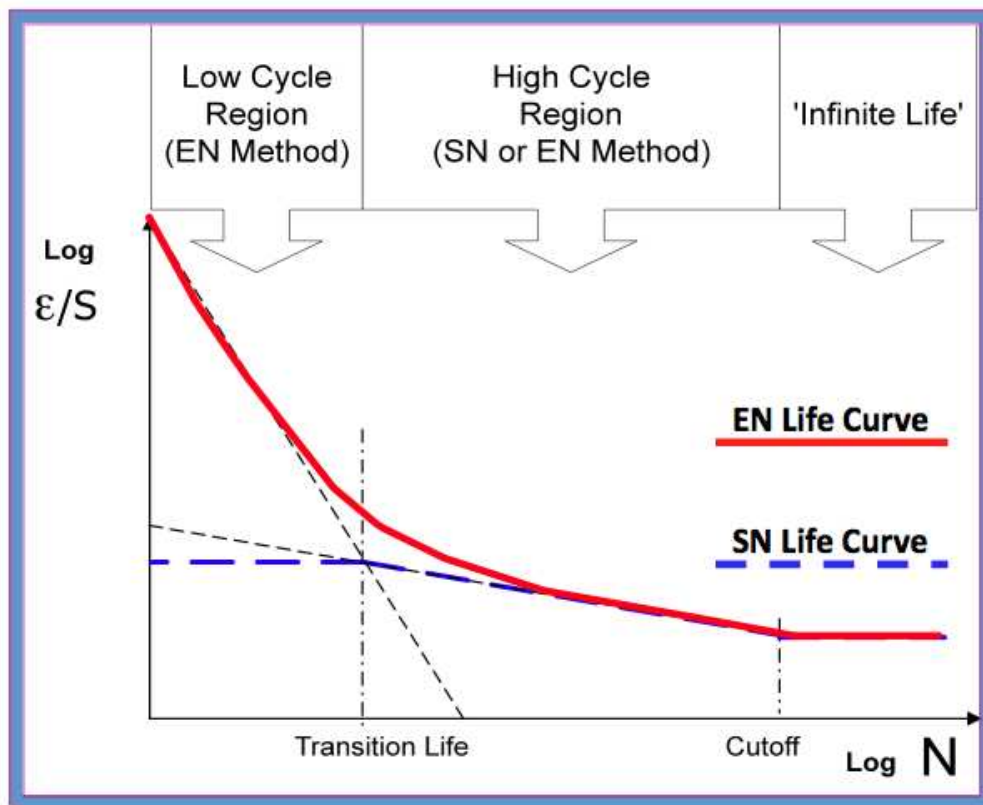


Figure 1 : Courbe de Whöler

On peut voir sur la figure 1 le domaine de fatigue oligocyclique qui précède le domaine de fatigue à grand nombre de cycles (courbe de Whöler), ce dernier aboutissant à la limite de fatigue asymptotique.

Ce modèle très simpliste a été amélioré lors de travaux sur la fragilisation thermomécanique de composants reportés en surface par des brasures étain / plomb pour prendre en compte l'influence du fluage. Ceci en intégrant, d'une part, la température des paliers hauts via une expression d'**Arrhenius**, d'autre part, la fréquence des cycles via une loi de puissance (la fréquence d'un cycle thermique symétrique est représentative de la durée du palier haut). Le modèle s'appuie sur la relation suivante [LAU-01] :

$$\frac{N_{réel}}{N_{essai}} = \left(\frac{\Delta T_{réel}}{\Delta T_{essai}} \right)^n \cdot \left(\frac{f_{réel}}{f_{essai}} \right)^a \cdot \exp \left(\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_{maxréel}} - \frac{1}{T_{maxessai}} \right) \right)$$

avec :

réel : utilisation réelle

essai : essai accéléré

N : nombre de cycles thermiques,

ΔT et *f* : amplitude et fréquence des cycles thermiques,

T_{max} : température maximale des cycles thermiques

E_a : énergie d'activation,

k_b : constante de Boltzmann,

n et *a* : paramètres respectivement de l'amplitude et de la fréquence des cycles thermiques.

L'expression précédente comporte 3 termes multiplicatifs qui conditionnent la dégradation thermomécanique:

- Le premier terme (principal) correspond au modèle de **Coffin-Manson**, (amplitude de la contrainte),
- Le second terme a pour but de tenir compte de la dynamique des cycles thermomécaniques (fréquence des cycles traduisant indirectement le gradient de température),
- Le troisième terme, de nature thermodynamique, a pour but de tenir compte des niveaux de température qui déterminent l'amplitude.

Ce modèle est largement utilisé dans le cadre des études et essais de fiabilité des composants et systèmes électroniques. Les guides les plus récents [FID-09], fournissent un catalogue de paramètres (*n*, *a*, E_a) relatifs à la plupart des composants actuels (discrets, intégrés, électromécaniques, etc).

2.4 Dégradation non thermo-activée

Le modèle courant pour décrire un mécanisme de dégradation peu dépendant de la température est basé sur une relation de type puissance inverse :

$$FA_{1/2} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^n$$

avec :

$FA_{1/2}$: facteur d'accélération entre un état 1 et un état 2 ($FA_{1/2} = \frac{t_1}{t_2}$ avec t_2 la durée d'exposition dans l'état 2 provoquant les mêmes dommages qu'une exposition de t_1 dans l'état 1),

S_1 : niveau de contrainte non thermique de l'état 1,

S_2 : niveau de contrainte non thermique de l'état 2,

n : paramètre associé à la contrainte S .

Ce type de modèle est par exemple utilisé pour les dégradations sous :

- Contraintes diélectriques des systèmes d'isolations soumis à des tensions maximales bien inférieures à leur tension de claquage intrinsèque ; dans ce cas, S est la valeur de la tension,
- Rayonnement ionisant de matériaux polymères ; dans ce cas, S est la valeur du débit de dose.

2.5 Paramètres de modèles de vieillissement

Des ordres de grandeurs de paramètres associés à des modèles de dégradation sont indiqués, à titre d'exemples, au tableau 1.

Produits (domaines)	Mécanismes de vieillissement	Modèles	Paramètres et observations
Polyamide 66 chargé à 30 % FV (électrotechnique)	Thermo-oxydation	Arrhenius Facteur d'accélération	Ea de 0,69 eV à 0,80 eV Vieillissement entre 130°C et 150°C Fin de vie : réduction de 10% de l'allongement à la rupture [ERI-01]
Organes électroniques (automobiles)	Vieillissement thermique	Arrhenius Facteur d'accélération	Ea de 0,7 eV Valeur retenue pour définir l'essai validant la tenue thermique [B 21 7130]
Carburant missile JP5 sans antioxydant	Vieillissement Thermique des peroxydes	Arrhenius Durée de vie	Ea de 0,83 eV et facteur pré exponentiel de $4,05 \cdot 10^{11}$ jours Vieillissements vers 50°C Fin de vie : teneur en peroxyde

			[LRBA-01]
Propergol SD1152 stabilisé	Vieillessement thermique des stabilisants	Berthelot Durée de vie	Facteur exponentiel de $-0,12\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ et facteur pré exponentiel de 354 100 jours Vieillessement entre 70°C et 90°C Fin de vie : teneur en stabilisant [LRBA-01]
Produits organiques	Consommation d'un stabilisant	Arrhenius Facteur d'accélération	Ea de 100 kJ.mol^{-1} (1,01 eV) Pas d'information [AECTP 600-01]
Matériaux métalliques	Oxydation	Arrhenius Facteur d'accélération	Ea de 76 kJ.mol^{-1} (0,79 eV) à 96 kJ.mol^{-1} (1,00 eV) Pas d'information [AECTP 600-01]
Matériaux polymères	Migration de plastifiant	Arrhenius Facteur d'accélération	Ea de 75 kJ.mol^{-1} (0,78 eV) à 85 kJ.mol^{-1} (0,88 eV) Pas d'information [AECTP 600-01]
Matériaux polymères	Diffusion d'humidité	Arrhenius Facteur d'accélération	Ea de 70 kJ.mol^{-1} (0,73 eV) Pas d'information [AECTP 600-01]
composants encapsulés plastique	Diffusion d'humidité jusqu'aux parties actives puis corrosion et/ou électromigration	Forme « Peck » Facteur d'accélération	Ea de 0,79 eV et n de 2,66 Encapsulation par des résines époxydes [PEC-01] Ea de 0,9 eV et n de 3 Encapsulation par des résines époxydes [PEC-02]

PA66	Thermo- oxydation	Arrhenius Facteur d'accélération	E _a de 0,9 à 1,2 eV Vieillissement entre 70°C et 250°C T _g entre 75°C et 80°C [KOH-01]
PA66	Probablement thermo-oxydation et hydrolyse	Arrhenius Facteur d'accélération	E _a de 1,8 eV Vieillissement en chaleur humide à 170-180 °C [KOH-01]
PA66 + 30% FV	Thermo- oxydation	Arrhenius Facteur d'accélération	E _a de 0,57 à 0,72 eV Thermogravimétrique [NOH-01]
PA66 + 30 % FV	Thermo- oxydation	Arrhenius Facteur d'accélération	matériau sec : E _a de 0,69 à 0,80 eV matériau à 50%HR avant mesure : E _a de 0,90 à 0,99 eV Vieillissement à 130, 140 et 150 °C. Critère de fin de vie : réduction de 10 % de l'allongement à la rupture. E _a peu différentes entre matériau « neuf » et matériau issu de recyclage (taux de recyclage de 25 % et 100 %). [ERI-01]

Tableau 1: Ordres de grandeurs de paramètres associés à des modèles de vieillissement

2.6 Échelle d'utilisation des modèles de dégradation

La modélisation d'un mécanisme de dégradation peut être réalisée via deux démarches bien distinctes :

- Une prise en compte « discrète » de l'effet des contraintes (fatigue thermomécanique, réactions chimiques, ...) est réalisable à l'échelle microscopique. Dans ce cas, la résolution

des équations passe souvent par la mise en œuvre de méthodes de simulations numériques. Cette démarche s'appuie sur des moyens de calculs importants et nécessite la connaissance d'un grand nombre de données relatives aux matériaux concernés soumis à des conditions environnementales variées. Cette démarche est spécifique, car elle concerne presque toujours un élément bien précis (un type de joint de brasure, un constituant donné, ...) jugé particulièrement sensible au mécanisme de vieillissement considéré.

- Une prise en compte "globale" de l'effet des contraintes (fatigue thermomécanique, réactions chimiques, ...) est réalisable à l'échelle macroscopique. Dans ce cas, les paramètres associés au modèle retenu dépendent spécifiquement des caractéristiques technologiques du matériel et des données utilisées pour apprécier son niveau de dégradation. Toute modification du matériel (procédés de fabrication, dimensions,...), des méthodes de caractérisation de son état ou des critères de fin de vie associés implique systématiquement une phase expérimentale de validation des paramètres de ce modèle.

La fragilisation thermomécanique du joint de brasure d'un composant **CMS** (composant monté en surface – SMT-Surface Mount Technology) permet d'illustrer les deux types de démarches précédentes [AUD-01].

La tenue en fatigue thermomécanique de brasures étain / plomb proches de l'eutectique (*en masse: environ 60 % de Sn et 40 % de Pb*) soumises à des sollicitations thermiques peut être estimée via l'équation de **Coffin & Manson**.

Compte tenu de la faible température de fusion de cet eutectique (183°C), la brasure soumise aux contraintes mécaniques a un comportement viscoplastique aux températures ambiantes (*déformations permanentes liées à la plasticité et au fluage*).

Dans ce contexte, lors de la procédure de maillage de la géométrie de l'assemblage brasé, il est judicieux de modifier la loi de **Coffin & Manson** en prenant également en compte le fluage, suivant le **modèle de Weertman** [AUD-01].

Une telle modification de la loi de **Coffin-Manson** peut être introduite suivant deux approches :

- Une approche basée sur la déformation :

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon'} \right)^{\frac{1}{c}}$$

avec :

N_f : Nombre de cycles à rupture

ε' : Coefficient de ductilité en fatigue

c : Exposant de ductilité en fatigue

$\Delta \varepsilon$: Amplitude de la déformation inélastique (plasticité et fluage).

La valeur du coefficient de ductilité en fatigue est de 0,325 dans la littérature.

L'exposant de ductilité en fatigue est calculé suivant les caractéristiques du cycle thermique d'après la relation :

$$c = -0,442 - 6.10^{-4} \cdot T_{moyen} + 1,74.10^{-2} \cdot \ln \left(1 + \frac{360}{t_{palier}} \right)$$

où T_{moyen} est la température moyenne en °C d'un cycle et t_{palier} la durée en min d'un demi-cycle.

La valeur de l'amplitude de la déformation inélastique peut être obtenue par un calcul non-linéaire par éléments finis. Cette méthode permet de déterminer la répartition spatiale des contraintes maximales au sein de la brasure.

- une approche basée sur la densité d'énergie de déformation viscoplastique :

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta W}{W'_j} \right)^{\frac{1}{c}}$$

avec :

W'_j : Coefficient de ductilité en fatigue

ΔW : Amplitude de la densité d'énergie de déformation viscoplastique.

La valeur du coefficient de ductilité en fatigue indiquée dans la littérature est de *1,38 MPa*. L'exposant de ductilité en fatigue est calculé suivant l'expression déjà indiquée.

La valeur de l'amplitude de la déformation inélastique peut être calculée par des méthodes simplifiées ou, plus précisément, par calcul non-linéaire par éléments finis.

L'approche basée sur la déformation (cf. a) conduit à un nombre de cycles avant rupture plus élevé que celle basée sur la densité d'énergie (cf. b) parce qu'elle omet de prendre en compte l'évolution de l'enveloppe de la déformation induite par le fluage lorsque le nombre de cycles thermiques augmente. Cette évolution est liée au phénomène viscoplastique de "*creep ratcheting*", d'autant plus influent que la hauteur des broches du composant est faible. Par contre, il ne perturbe pratiquement pas la densité d'énergie de déformation viscoplastique. C'est pourquoi l'approche basée sur la densité d'énergie de déformation viscoplastique fournit des valeurs plus réalistes de la tenue en fatigue des joints de brasures.

Dans le cadre d'une démarche globale, le modèle de **Coffin & Manson** est utilisé, indépendamment du type d'assemblage considéré, dans son expression la plus simple. On admet donc que l'amplitude de la déformation inélastique qui provoque le dommage est proportionnelle à l'écart de température entre les paliers à haute et basse températures.

Le facteur d'accélération peut alors s'écrire simplement (cf paragraphe 2.3) :

$$FA_{1/2} = \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^n$$

ou en introduisant l'influence de la fréquence (*f*) des cycles thermiques et la correction d'Arrhenius:

$$\frac{N_{réel}}{N_{essai}} = \left(\frac{\Delta T_{réel}}{\Delta T_{essai}} \right)^n \cdot \left(\frac{f_{réel}}{f_{essai}} \right)^a \cdot \exp \left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{maxréel}} - \frac{1}{T_{maxessai}} \right) \right)$$

Les paramètres intervenant dans ces expressions sont spécifiques de l'assemblage considéré et doivent être validés expérimentalement. L'exposant associé aux variations de température est, soit fixé à 2, soit identifié à l'inverse de la valeur de l'exposant de ductilité en fatigue. La valeur de l'exposant associé à la *fréquence des cycles* est souvent fixée à 1/3 (valeur issue de travaux réalisés par **IBM**, [AUD-01]). L'énergie d'activation peut varier dans un domaine très large de 0,1 à 1,1 eV suivant la valeur de la température du palier haut des cycles.

La simulation par éléments finis basée sur un maillage de l'assemblage est traditionnellement utilisée pour évaluer la tenue en fatigue thermomécanique de brasures.

Cette démarche est le plus souvent associée à la réalisation d'au moins un essai accéléré (dont le profil est déterminé par les calculs) ainsi qu'à une caractérisation fine du mécanisme de fatigue (par exemple par examen de micro sections sous très forts grossissements au microscope électronique à balayage).

Ceci afin de valider, d'une part les données issues de la bibliographie et utilisées dans les calculs, d'autre part le modèle numérique qui suppose un assemblage parfait, exempt de défauts de fabrication.

La confrontation entre les résultats des calculs et des essais accélérés permet de vérifier que d'éventuels défauts présents au niveau des joints de brasure (porosités, fissures) n'influencent pas significativement leur durée de vie. Dans le cas contraire, un modèle prenant en compte ces défauts doit être utilisé, impliquant une approche numérique plus complexe.

2.7 Exemples d'application de modèles de dégradation

2.7.1 Fiabilité d'un dispositif électronique soumis à des températures extrêmes

Problématique

Le fonctionnement d'un coffret électronique, installé à poste fixe dans l'environnement naturel d'une zone climatique chaude et sèche, est conditionné par les températures extrêmes qui lui sont imposées. Ces températures diurnes apparaissent un certain nombre de jours au cours du mois le plus chaud de l'année.

Connaissant la distribution de la température de tenue du dispositif, l'objectif consiste à estimer sa probabilité de défaillance à l'issue d'un temps de mission déterminé. Ce cas d'application se situe dans un contexte particulier de la méthode « *Résistance-Contrainte* », sachant que la distribution des températures résulte d'une suite de valeurs croissantes, en nombre fini.

La probabilité de défaillance résulte d'une interaction entre une distribution extrême de la contrainte et une distribution log-normale de la tenue. On peut la déterminer comme suit de manière approchée, avec une précision acceptable.

Formulation du problème

On connaît la distribution statistique des températures journalières diurnes correspondant au mois le plus chaud de l'année [MAR-01]. Cette distribution est une normale ayant pour paramètres :

- Moyenne : $m = 30\text{ °C}$ (303.15 K),
- Ecart-type : $s = 3\text{ °C}$ (3 K)
- Coefficient de variation : $\gamma_n = 10\%$

Au cours de ce mois le plus chaud, la valeur maximale résulte de 30 valeurs journalières, mais pour éliminer l'influence d'une corrélation significative entre deux jours consécutifs, on ne considère que 15 valeurs.

La distribution de la résistance du dispositif est approximativement log-normale, ayant pour paramètres:

- Moyenne : $\mu_r = 43\text{ °C}$ (316.15 K)
- Coefficient de variation : $\gamma_r = 5\%$

L'objectif consiste à estimer la probabilité de défaillance du dispositif à l'issue d'une durée de mission fixée à 10 ans, au cours de laquelle il sera soumis à $n = 150$ températures journalières maximales issues de la distribution normale ci-dessus.

Résolution du problème

À l'issue de la durée de mission, le dispositif aura subi ($n=150$) températures successives dont la distribution est celle de valeurs extrêmes maximales.

La distribution parente étant normale, on sait que la distribution de ses valeurs maximales est attirée par une distribution de **Gumbel** [FIS-01]. Cette tendance asymptotique est approximativement vérifiée dès que l'effectif est suffisamment élevé, ce qui est le cas ici ($n = 150 \gg 1$).

La fonction de répartition correspondante s'écrit [GUM-01] :

$$G^{max}(z) = \exp[-\exp(-z)]$$

expression dans laquelle apparaît la variable réduite (z) telle que :

$$z = \left[\left(x - \mu_g \right) / \left(\sigma_g \right) \right]$$

Les paramètres de localisation (mode μ_g) et d'échelle (dispersion σ_g) peuvent être déterminés explicitement en fonction des paramètres (m, s) de la distribution parente et du nombre (n) de sollicitations :

$$\mu_g \approx m + \left(s / \sqrt{2 \cdot \text{Log} n} \right) \cdot \left[\left(\text{Log} n^2 \right) - \left(\text{Log} \sqrt{\text{Log} n} \right) - \left(\text{Log} 2 \cdot \sqrt{\pi} \right) \right]$$

$$\sigma_g \approx \left[(s) / (2 \cdot \text{Log} n)^{1/2} \right]$$

Cette distribution extrême qui correspond aux contraintes de l'environnement a pour paramètres statistiques, une moyenne (μ_e) et un coefficient de variation (γ_e), tels que :

$$\mu_e = \mu_g + C \cdot \sigma_g$$

$$\gamma_e = \left(\pi / \sqrt{6} \right) \cdot \left[\left(\sigma_g \right) / \left(\mu_g + C \cdot \sigma_g \right) \right]$$

expressions dans lesquelles intervient la constante d'Euler (C).

Alors, la probabilité de défaillance maximale à la fin de la durée de mission est approximativement égale à [PIE-01] :

$$P_d \approx 1 - \Phi(\beta_{re})$$

$$\beta_{re} \approx \left[\text{Log}(\mu_r / \mu_e) / \left(\gamma_r^2 + \gamma_e^2 \right)^{1/2} \right]$$

Il s'agit d'approximations basées sur la fonction de répartition de la loi normale réduite $\Phi(\bullet)$ de l'indice de fiabilité (β_{re}).

Application numérique

Tous calculs faits, on obtient les valeurs suivantes :

- Loi contraintes environnement: $\mu_e \approx 38.081$ °C (311.231 K) & $\gamma_e \approx 3.19$ % (0.39 %)
- Loi de la résistance du dispositif: $\mu_r = 43$ °C (316.15 K) & $\gamma_r = 5\%$ (0.68 %)
- Indice de fiabilité: $\beta_{re} \approx 2$
- Probabilité de défaillance: $P_d \approx 2$ %

Cette dernière valeur est d'un ordre de grandeur compatible avec une application réelle du domaine militaire terrestre.

Nota: dans ce cas, les calculs effectués à partir des températures exprimées en °C ou en Kelvin conduisent approximativement au même résultat. Ceci parce que l'écart entre températures d'environnement et de résistance ainsi que leurs coefficients de variation sont relativement faibles. Il en résulte que l'indice de fiabilité reste pratiquement invariant lorsqu'on introduit la transformation linéaire qui relie ces deux échelles de température (proportionnalité à un paramètre de décalage près).

2.7.2 Durée de vie d'un propergol

Problématique

Le maintien des propriétés d'un propergol est lié à la stabilité temporelle de ses caractéristiques, laquelle est obtenue par adjonction d'un produit "stabilisant". Or ce "stabilisant" se dégrade et disparaît progressivement au cours du temps, en fonction de la température et ce, d'autant plus vite que celle-ci est élevée.

Conventionnellement, on considère que l'allumage du propergol n'est plus garanti dès lors que 50% du "stabilisant" a été dégradé. Ceci conduit à définir une durée de vie médiane correspondant à une probabilité de 50%, en utilisant la loi de **Berthelot** [BER-01].

Tout d'abord, nous allons montrer que cette loi n'est qu'une approximation de la **loi d'Arrhenius**. Puis nous déduirons les paramètres de la **loi d'Arrhenius** à partir des paramètres de la loi de **Berthelot**, ceux-ci étant issus de mesures réalisées dans un intervalle restreint de températures.

Habituellement, la durée de vie du "stabilisant" est déterminée en considérant que le propergol est soumis en permanence à une température constante. Cette approche déterministe implique de définir une température "équivalente" supposée représentative des fluctuations de l'environnement thermique au cours du cycle de vie du propergol.

La détermination de cette température "équivalente" est quelque peu arbitraire et, pour y échapper, il est plus réaliste de considérer un profil de température fonctionnel défini statistiquement sur une plage dont les bornes sont physiquement justifiées. Nous utilisons cette approche pour définir la durée de vie du "stabilisant" en fonction de cette plage de température. [PIE-10].

Lois de vieillissement

La durée de vie médiane s'écrit comme, suivant la loi de Berthelot:

$$D_B \approx B \cdot \exp \left(-\frac{\vartheta}{\vartheta_a} \right)$$

expression dans laquelle les températures sont exprimées en (°C), la cinétique de dégradation étant caractérisée par une température d'activation (ϑ_a).

Cette loi de dégradation est empirique, car elle ne peut se justifier intrinsèquement par des considérations thermodynamiques : d'une part sa forme ne correspond pas à celle de la **loi d'Arrhenius**, d'autre part elle tient compte d'une échelle de température différente de l'échelle absolue.

La **loi d'Arrhenius** prise comme référence s'écrit:

$$D_A = A \cdot \exp \left(-\frac{T_a}{T} \right)$$

expression dans laquelle les températures absolues sont exprimées en (K), la cinétique de dégradation étant caractérisée par une température d'activation (T_a) qui s'identifie, à une constante près (celle de *Stefan-Boltzmann*), à l'énergie d'activation du processus thermodynamique

($1eV = 11\,600\,K$).

La loi de **Berthelot** impose une forme exponentielle dont l'argument est proportionnel à une température exprimée dans une échelle différente de l'échelle absolue [PIE-10] (article ASTELAB 2010).

Dans ces conditions, l'identification de ses paramètres à ceux de la **loi d'Arrhenius** n'est qu'approximative, puisqu'elle résulte d'une linéarisation, autour d'une température moyenne, de l'inverse d'une température absolue.

Application numérique

Des essais de dégradation d'un "stabilisant" ont été réalisés au voisinage de ($\vartheta = 80\,^{\circ}C$), dans une plage assez restreinte ($70 - 90\,^{\circ}C$).

Les paramètres de la loi de **Berthelot** identifiés à partir de ces essais étaient les suivants :

$$B \approx (131/370)10^6 \text{ jours}$$

$$\vartheta_a \approx (90/11)\,^{\circ}C$$

D'où les paramètres équivalents d'**Arrhenius**, identifiés en valeur moyenne sur la plage ($70 - 90\,^{\circ}C$):

$$A \approx 7 \cdot 10^{-18} \text{ jours}$$

$$T_a \approx 15\,000\,K \text{ (Correspondant à environ } 1,30\,eV \text{)}.$$

La poursuite de l'exemple d'application nous conduit à supposer que cette **loi d'Arrhenius** est invariante, donc que ses paramètres sont constants dans une plage de température assez large, compatible avec la variabilité de l'environnement thermique du "stabilisant".

On notera que, dans la réalité, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée, ce qui se traduit par une estimation plus incertaine de la durée de vie.

Approche statistique

Une estimation réaliste de la durée de vie du "stabilisant" n'implique pas nécessairement de considérer un profil d'environnement thermique pas trop détaillé. Deux types principaux de profil thermique sont envisageables :

- Un profil périodique temporellement variable : si la fluctuation relative de la température autour de sa valeur moyenne est inférieure à 20 % environ, la durée de vie peut être définie approximativement à partir de la température moyenne supposée constante; l'application déterministe de la loi d'Arrhenius qui en découle ne présente pas de difficulté majeure et ce cas ne sera pas considéré ici.
- Un profil statistique indépendant du temps : une information minimale correspond à une distribution équiprobable de la température entre les températures minimale et maximale qui bornent la plage des fluctuations de l'environnement thermique du "stabilisant", au cours de son cycle de vie.

L'intégration de la **loi d'Arrhenius** conduit à une solution exacte non explicite, mais si la plage de variation est suffisamment large, ($T_2 - T_1 \geq 20\,K$), on peut retenir l'expression approchée

[PIE-03] :

$$D_A(T_1, T_2) \approx \left[A/T_a (T_2 - T_1) \right] \cdot \left[1 + (2 T_1 / T_a) \right] \cdot (T_1)^2 \cdot \exp(T_a / T_1)$$

A titre d'application numérique, avec les paramètres définis ci-dessus, on considère les profils thermiques suivants:

Température maximale : $T_2 = 373\,K$ ($100\,^{\circ}C$)

Températures minimales:

$$T_1 = 293 \text{ K } (20^\circ \text{C}), 313 \text{ K } (40^\circ \text{C}), 333 \text{ K } (60^\circ \text{C}), 353 \text{ K } (80^\circ \text{C})$$

Le tableau 2 regroupe les durées de vie correspondantes :

Température T_1	293 K (20°C)	313 K (40°C)	333 K (60°C)	353 K (80°C)	$T_2 = 373 \text{ K}$ (100°C)
$(T_2 - T_1)$	80 K	60 K	40 K	20 K	0 K
Durées vie D_A	8 908 j (24 ans)	516 j (17 mois)	49 j (1,6 mois)	9 j (1,3 semaines)	2 jours

Tableau 2: Exemples de durées de vie en fonction de la température

On constate l'extrême sensibilité de la durée de vie à la largeur de la plage de température aléatoire, et l'importance de la température minimale.

En considérant la plage d'étendue maximale (20 à 100 °C), un raisonnement simpliste supposant une température moyenne déterministe (333 K, soit 60 °C) conduirait à une durée de vie de l'ordre de 256 jours (8,5 mois), considérablement inférieure à la valeur réelle (24 ans).

Ce résultat très pessimiste traduit l'arbitraire attaché au choix a priori d'une température constante réputée "équivalente": contrairement à l'intuition, la forte non-linéarité de la **loi d'Arrhenius** n'autorise pas de considérer une moyenne arithmétique.

Dans le cas considéré, la température "équivalente" au sens de la dégradation induite par la **loi d'Arrhenius** serait définie par l'identité:

$$T_e = \left[T_a / \ln(D_A / A) \right]$$

Soit environ :

- +36 °C pour l'intervalle de 80 K (température moyenne arithmétique de +60°C),
- +55 °C pour l'intervalle de 60 K (température moyenne arithmétique de +70°C),
- +73 °C pour l'intervalle de 40 K (température moyenne arithmétique de +80°C),
- +87 °C pour l'intervalle de 20 K (température moyenne arithmétique de +90°C).

La prise en compte d'une moyenne arithmétique n'est donc approximativement acceptable que pour des intervalles de température suffisamment étroits.

2.7.3 Vieillessement thermique d'un matériel

Estimation de sévérités d'essais thermiques

Pour illustrer l'application du modèle d'**Arrhenius** dans une démarche globale, on prend l'exemple d'un matériel uniquement sensible à la dégradation purement thermique. Le vieillissement thermique de ce matériel est décrit par une loi de type **Arrhenius** avec une énergie d'activation de 0,6 eV.

Ce matériel est soumis pendant 20 ans à une température comprise entre -10°C et 10°C pendant 4% du temps (phase 1), entre 10°C et 20°C pendant 25% du temps (phase 2), entre 20°C et 30°C pendant 42% du temps (phase 3), entre 30°C et 40°C pendant 25% du temps (phase 4) et entre 40°C et 60°C pendant 4% du temps (phase 5).

Dans le cadre de la validation de la tenue thermique de ce matériel, deux types d'essais sont envisagés :

- Essai I : exposition à la chaleur sèche continue sous 100°C
- Essai II : exposition à des cycles thermiques avec :
 - o 2 heures à 80°C (étape 1),
 - o passage de 80°C à 120°C en 0,5 heure (étape 2),
 - o 2 heures à 120°C (étape 3),
 - o passage de 120°C à 80°C en 0,5 heure (étape 4).

Les durées de ces deux essais doivent être définies de manière à générer des dommages thermiques équivalents à *20 ans* d'exploitation. L'estimation des durées de ces essais est réalisée via le calcul du facteur d'accélération.

Pour l'essai I, le facteur d'accélération (FA) s'écrit :

$$FA = t_{\text{réel}} / t_{\text{essai}} = t_{\text{réel}} / (a_1 \cdot t_{\text{réel}} / FA_1 + a_2 \cdot t_{\text{réel}} / FA_2 + a_3 \cdot t_{\text{réel}} / FA_3 + a_4 \cdot t_{\text{réel}} / FA_4 + a_5 \cdot t_{\text{réel}} / FA_5)$$

avec :

$t_{\text{réel}}$: La durée d'exploitation,

t_{essai} : La durée de l'essai de chaleur sèche,

a_1 à a_5 : Les pourcentages d'occurrence respectivement des phases 1 à 5

FA_1 à FA_5 : Les facteurs d'accélération associés respectivement aux phases 1 à 5

On a donc l'expression :

$$FA = 1 / (a_1 / FA_1 + a_2 / FA_2 + a_3 / FA_3 + a_4 / FA_4 + a_5 / FA_5)$$

Les calculs des facteurs d'accélération de chaque phase sont réalisés via l'expression d'**Arrhenius** en prenant en compte les températures moyennes des domaines correspondants. Le facteur d'accélération FA est ainsi évalué à 83 soit une durée d'essai d'environ *88 jours* pour représenter *20 ans* d'exploitation.

Le calcul réalisé en associant l'exploitation réelle à une température globale pondérée de 25°C (température sans aucun sens physique) donne un facteur d'accélération de 109 soit une durée d'essai d'environ *67 jours* pour représenter *20 ans* d'exploitation. Cet écart illustre qu'une application déterministe de la loi d'Arrhenius (prise en compte de températures moyennes) n'est envisageable que sur des plages de température suffisamment fines.

Pour l'essai II, le facteur d'accélération (FA) s'écrit :

$$FA = t_{\text{réel}} / t_{\text{essai}} = t_{\text{réel}} / (a_1 \cdot t_{\text{réel}} / FA_1 + a_2 \cdot t_{\text{réel}} / FA_2 + a_3 \cdot t_{\text{réel}} / FA_3 + a_4 \cdot t_{\text{réel}} / FA_4 + a_5 \cdot t_{\text{réel}} / FA_5)$$

avec :

$t_{\text{réel}}$: La durée d'exploitation,

t_{essai} : La durée de l'essai de chaleur sèche,

a_1 à a_5 : Les pourcentages d'occurrence respectivement des phases 1 à 5

FA_1 à FA_5 : Les facteurs d'accélération associés respectivement aux phases 1 à 5

Les facteurs d'accélération associés à chaque phase sont donnés par une combinaison linéaire des facteurs d'accélération spécifiques à chaque étape du cycle thermique soit par exemple pour FA_1 :

$$FA_1 = (2/5).FA_{\text{étape1}} + (0,5/5).FA_{\text{étape2}} + (2/5).FA_{\text{étape3}} + (0,5/5).FA_{\text{étape4}}$$

Les calculs des facteurs d'accélération de chaque étape sont réalisés via l'expression d'**Arrhenius** en prenant en compte les températures de 80°C pour l'étape 1, 100°C pour l'étape 2, 120°C pour l'étape 3 et 100°C pour l'étape 4. Le facteur d'accélération FA est ainsi de 114 soit une durée d'essai d'environ 64 jours pour représenter 20 ans d'exploitation.

2.8 Les écarts entre la réalité et les prévisions

La validation des prévisions tirées d'un modèle de dégradation, qu'il soit développé à un niveau microscopique ou de manière plus globale, consiste toujours, si l'échelle de temps le permet, à les confronter à la réalité.

Les écarts observés permettent de juger de la pertinence, d'une part, des hypothèses de base du modèle, d'autre part, des valeurs des paramètres utilisés dans le modèle.

Les sources d'écarts les plus fréquentes sont :

Modélisation à l'échelle microscopique :

Ce type de modélisation repose souvent sur la prise en compte de systèmes considérés comme homogènes. C'est à dire exempts de défauts de structures ou d'insertions d'éléments étrangers, ce qui est rarement le cas de matériaux réels.

Cette hypothèse simplificatrice est presque toujours mise en cause lors de constats d'écarts significatifs entre résultats issus du modèle et des observations expérimentales. En outre, d'une manière générale, cette démarche implique la connaissance d'un nombre important de paramètres physiques (modules d'Young, coefficients de Poisson, capacités calorifiques, coefficients de diffusion, ...) ou chimiques (enthalpies, constantes de réaction, ..) dont les valeurs ne sont pas toujours disponibles.

Ces valeurs sont alors extrapolées de travaux antérieurs, estimées au moyen d'essais spécifiques ou prises égales à celles de matériaux de nature voisine. Il en découle donc des incertitudes paramétriques qui influencent les prévisions du modèle. On peut alors recalculer les valeurs de ces paramètres en fonction d'une première comparaison entre résultats théoriques et expérimentaux.

Modélisation macroscopique globale :

La prise en compte de l'effet global d'un environnement climatique sur un matériel peut se traduire par une loi de dégradation dont la validité est restreinte à un domaine climatique donné. Ce domaine de validité est celui pour lequel le mécanisme de dégradation prépondérant du matériel est effectivement décrit par le modèle de dégradation retenu.

Toute prévision réalisée en dehors du domaine de validité du modèle de dégradation est sujette à caution : elle pourrait être acceptable ou tout à fait fantaisiste, mais rien ne permet de le savoir. L'étendue du domaine de validité d'un modèle de dégradation est évidemment fonction de la nature du matériel considéré. L'application d'un modèle de dégradation en dehors de son domaine de validité constitue la source d'erreur la plus courante.

Un exemple typique concerne le vieillissement par thermo-oxydation d'une pièce en polyamide 6 utilisée à l'air libre en l'absence de contact avec un électrolyte aqueux. Un premier modèle de dégradation est valable entre 10°C (température en dessous de laquelle la vitesse de thermo-oxydation n'est pas significative) et 50°C (température de transition vitreuse). Un second modèle s'applique entre 50°C (température de transition vitreuse) et 220°C (température de fusion). Dans ces conditions, un modèle unique ne pourra représenter correctement les phénomènes de dégradation susceptibles d'apparaître sur des plages de températures qui recouvrent les températures de transition, a fortiori sur la plage maximale (10°C- 220°C).

Un autre exemple classique concerne l'estimation de la fiabilité prévisionnelle des composants électroniques à leur température d'utilisation opérationnelle à partir d'essais (accélérés) réalisés à plus haute température, dont les résultats sont exploités via un modèle simple d'**Arrhenius**. En fait, les mécanismes de défaillance mis en jeu et les énergies d'activation correspondantes peuvent varier avec la température. D'une manière générale, pour les composants électroniques, les énergies d'activation sont plus faibles aux basses températures (températures d'exploitation des matériels) qu'aux hautes températures (températures des essais donnant lieu aux déterminations des énergies d'activation). Dans ces conditions, un taux de défaillance extrapolé à une température donnée d'exploitation à l'issue d'essais réalisés à plus hautes températures sera inférieur au taux de défaillance réel. Ce biais est connu et pris en compte dans le domaine des composants électroniques de manière très grossière. En effet, ces études concluent que l'objectif de fiabilité est vraisemblablement atteint si le taux de défaillance extrapolé est au moins d'un ordre de grandeur inférieur à celui attendu. La prudence s'impose surtout lorsque l'énergie d'activation associée au vieillissement thermique d'un composant est trouvée supérieure ou égale à 0,80 eV [GIG-01].

Une autre source importante d'écart entre prévisions et réalité concerne la variabilité des paramètres affectés au modèle de dégradation. Comme indiqué aux paragraphes précédemment, les valeurs de ces paramètres dépendent non seulement du matériel pris en compte mais aussi de la nature du paramètre caractérisant l'évolution de son vieillissement ainsi que du critère de fin de vie associé.

D'une manière générale, les paramètres caractérisant l'évolution du vieillissement d'un matériel doivent refléter l'utilisation qui en est faite. De plus, il convient, dans le cadre de la modélisation, de prendre en compte l'évolution de la propriété la plus restrictive du matériau ou matériel susceptible de limiter la tenue de ce matériel [NF EN 60544-4]. Cette observation concernant la variabilité des paramètres d'un modèle de dégradation est particulièrement pertinente lorsque le vieillissement thermique d'un matériel est modélisé par la **loi d'Arrhenius** car :

- d'une part, cette forme de loi est associée à des fondements thermodynamiques de sorte qu'elle peut inspirer à tort une certaine confiance aux valeurs de paramètres qui lui sont associés ; il faut simplement rappeler que l'expression sous forme **Arrhenius** de la vitesse de dégradation n'est établie que pour une réaction chimique d'ordre 1 (paragraphe 2.1) ce qui ne correspond à pratiquement aucun cas réel et que l'énergie d'activation déterminée à partir d'essais résulte de caractérisations macroscopiques dont le lien avec le niveau d'avancement des réactions microscopiques de vieillissement est généralement indirect,
- d'autre part, la valeur d'énergie d'activation intervient dans un terme exponentiel et donc influence fortement le résultat des prévisions. Par exemple, pour une énergie d'activation de 70 kJ des incertitudes de 15% et de 5% sur cette énergie d'activation se traduisent par des incertitudes de, respectivement 34% et 11%, sur l'estimation du facteur d'accélération entre 20°C et 45°C [LEV-01].

Cet exemple illustre bien la nécessité de déterminer avec précision l'énergie d'activation associée à la dégradation thermique d'un matériel. C'est ainsi que les normes **CEI** décrivent des protocoles d'essais rigoureux et des méthodes d'exploitation statistique des données permettant de modéliser le vieillissement thermique des isolants électriques [CEI 60216]. Ces référentiels proposent de vérifier la validité de l'application du modèle d'Arrhenius en appliquant le test de Fischer et la dispersion des données en appliquant le test de Bartlett. Bien que la méthodologie décrite semble rigoureuse, elle apparaît trop complexe pour être utilisable dans le cas d'un matériel (nombre trop important de matériels à soumettre aux essais).

3. SPECTRES DE REPONSE EXTREME ET SPECTRE DE DOMMAGE PAR FATIGUE

La démarche proposée ci-dessous ne concerne que la prise en compte des effets créés par les variations de la température. En particulier les contraintes mécaniques induites par les gradients thermiques et les effets liés à la cinétique chimique.

3.1 Comparaison de spécifications

L'analyse de l'environnement en vue de l'écriture de spécifications selon la méthode de personnalisation proposée par les normes **GAM EG 13** et **MIL STD 810 G** suppose l'existence d'outils permettant la comparaison de la sévérité relative de plusieurs sollicitations.

Dans le domaine mécanique, il existe des méthodes s'appuyant sur la comparaison de la réponse d'un système mécanique étalon masse-ressort amortisseur à partir de différentes courbes :

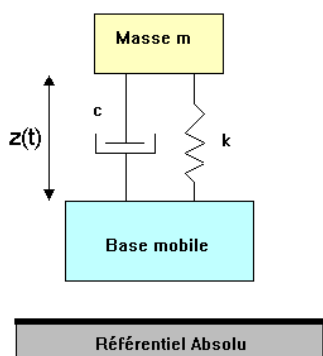


Figure 2: Système mécanique à 1 ddl

- spectre de réponse au choc, donnant le déplacement réponse le plus grand (lié à la contrainte) de ce système soumis à un choc, en fonction de sa fréquence propre,
- spectre de réponse extrême, identique au spectre de réponse au choc pour une vibration de nature quelconque,
- spectre de dommage par fatigue, indiquant pour chaque fréquence propre le dommage par fatigue subi par le système du fait de l'accumulation des cycles de contrainte pendant toute la durée de la vibration.

Ces méthodes permettent de comparer la sévérité de plusieurs sollicitations à partir de critères mécaniques, mais aussi de cumuler les effets de plusieurs environnements mécaniques, d'écrire une spécification d'essai de même sévérité, de réduire sa durée, ...

Dans le domaine thermique, il n'existe pas d'outils analogues. L'objet de cette étude est de proposer une méthode comparable applicable dans le cas des sollicitations thermiques dynamiques pour effectuer les mêmes opérations.

Les effets de la température sont multiples. Vis-à-vis des sollicitations dynamiques, l'un des effets importants est la création d'une contrainte liée au gradient thermique dans le matériau.

La méthode proposée ici ne peut donc être utilisée que dans le cas de sollicitations thermiques dynamiques. Sollicitations caractérisées par des vitesses de variation de la température suffisamment rapides pour créer des gradients thermiques dans les matériaux exposés.

Lorsqu'un matériau est chauffé ou refroidi lentement, il se dilate uniformément sans contrainte résiduelle, en passant d'une longueur ℓ à une longueur $\ell + d\ell$. La variation de longueur $d\ell$ est proportionnelle à la variation de température :

$$\varepsilon_{th} = \frac{d\ell}{\ell} = \alpha dT = \alpha (T - T_0) \quad (1)$$

(α = constante de dilatation thermique linéique). Cette loi peut être généralisée au cas tridimensionnel pour un matériau isotrope.

Toutefois, si le déplacement du matériau est restreint, le changement de volume causé par la température peut ne pas être possible et des contraintes mécaniques pourront alors se développer.

La loi de comportement thermo-élastique s'obtient à partir de la **loi de Hooke** classique $\sigma = E \varepsilon$ et de la relation (1) ci-dessus :

$$\sigma = E (\varepsilon - \varepsilon_{th})$$

Si l'on impose une déformation nulle, la contrainte thermique est égale à $|\sigma| = \varepsilon_{th} E$ et

$|\sigma_{thermique}| = \alpha E \Delta T$. Si la déformation est libre, la dilatation est égale à ε_{th} :

Des contraintes thermiques se développent aussi

à l'interface de deux matériaux avec des coefficients de dilatation thermique différents sous l'effet d'un changement de température.

Lors de changements rapides de température. La température à un instant donné du matériau varie en fonction de la distance x du point considéré par rapport à la face avant de la pièce soumise aux cycles thermiques. La contrainte dans une tranche $\Delta x = x_2 - x_1$ du matériau est d'autant plus grande que la variation de température $\Delta T = T_2(x_2) - T_1(x_1)$ entre est plus élevée, soit que le

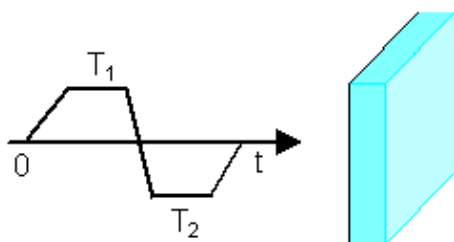
gradient $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ est plus grand.

Au stade de l'élaboration de la spécification, il est rare que les caractéristiques thermiques du matériel soient connues et le calcul exact des gradients n'est pas possible.

La comparaison de sévérité entre plusieurs cycles thermiques (environnements réels, normes, ...) ou l'écriture d'une spécification synthétisant plusieurs environnements est donc effectuée non pas sur la structure réelle, mais plutôt sur un modèle simple.

3.2 Modèle étalon (ou de référence)

En mécanique, le modèle le plus simple est le système à un degré de liberté masse-ressort-amortisseur, caractérisé par sa fréquence propre et sa surtension (figure 2). En thermique, nous avons retenu le mur semi-infini (figure 3), constitué d'un matériau de diffusivité « a » telle que :



$$a = \frac{\lambda}{c \rho}$$

où λ = conductivité

c = capacité thermique

ρ = masse volumique.

Figure 3 : Mur semi-infini

Ce système simplifié ne prétend pas représenter la structure réelle. Il s'agit simplement d'un modèle de référence permettant de comparer les effets de plusieurs environnements indépendamment de la structure réelle à un stade du projet où elle n'est pas suffisamment connue.

On suppose ensuite que deux environnements qui produisent les mêmes effets sur cet « étalon » auront la même sévérité sur la structure réelle étudiée, plus complexe que ce modèle. Nous verrons que cette hypothèse n'est pas irréaliste dans la mesure où les gradients les plus grands sont observés sur la peau de la structure.

3.3 Critères de sévérité

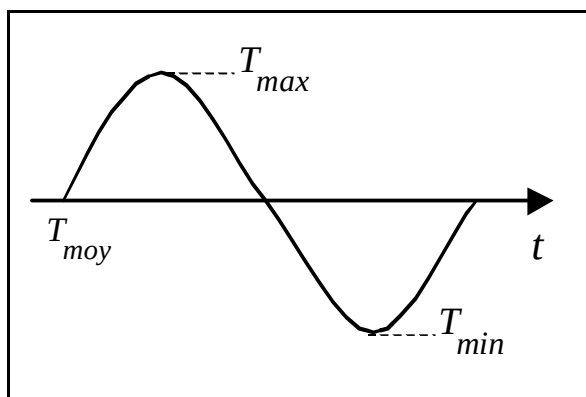


Figure 4 : Profil de température

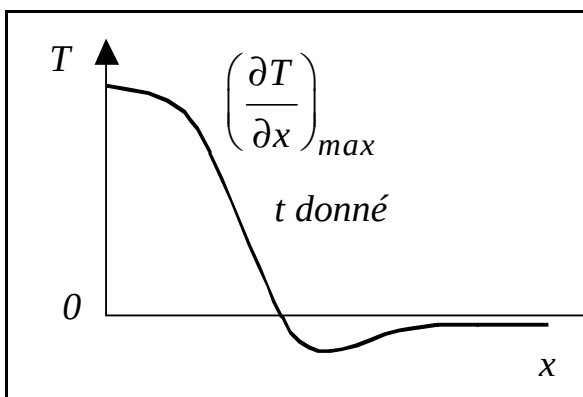


Figure 5 : Température dans le mur

Comme en mécanique, on peut considérer l'effet instantané de cette contrainte (équivalent du spectre de choc ou de réponse extrême) ou, dans le cas de variations de longue durée, l'effet de fatigue.

Un autre effet important de la température est son action sur la vitesse des réactions chimiques. Etant donné un profil de température appliqué pendant une certaine durée, on peut évaluer le pourcentage de molécules transformées dans un temps donné et comparer ce nombre à celui relatif à un second profil.

3.4 Spectre de réponse extrême thermique

Etant donné un environnement thermique caractérisé par une variation de température en fonction du temps (transitoire ou de longue durée), nous nous proposons de calculer la valeur extrême du gradient thermique dans l'épaisseur d'un mur semi-infini de diffusivité « a ».

Ceci suppose le calcul de la température réponse dans le mur en fonction de la distance de la face avant à chaque instant, le calcul de la pente de chacune de ces courbes, puis le relevé de la valeur la plus grande. Cette valeur obtenue pour la diffusivité « a » permet d'afficher un point du spectre. Le spectre complet est tracé en reprenant ces calculs pour différentes valeurs de « a » variable dans un domaine particulier.

Le calcul de la réponse passe par la résolution de l'équation aux dérivées partielles :

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

T = température (K)

x = profondeur (m)

t = temps (s).

Dans le cas général d'une température variable de façon quelconque en fonction du temps, il n'y a pas de solution analytique simple. Le calcul de la température à chaque instant « t » et à chaque profondeur « x » ainsi que celui du gradient de température peut être effectué par éléments finis.

Les calculs peuvent être effectués :

- soit en supposant que la température de la face avant suit le profil spécifié. Ce cas, qui ne correspond pas aux situations pratiques des problèmes qui nous concernent, ne sera pas traité ici.
- soit en considérant que le profil de température spécifié est celui de l'air ambiant. Dans cette hypothèse, il est nécessaire de fixer 3 autres paramètres intervenant dans le calcul du flux donné par la relation approchée :

$$\Phi = h \left(T_{air} - T_{paroi} \right)^{(1+\beta)} + \varepsilon \sigma \left(T_{air}^4 + T_{paroi}^4 \right)$$

où h = coefficient de convection ($W.K/m^2$)

β = exposant (0,25 pour l'air)

ε = émissivité

σ = constante de Stephan-Boltzmann ($\sigma = 5,670\ 400 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T = température absolue (K).

Nota: Influence des paramètres de calcul

Une simulation numérique a montré que les résultats d'une comparaison de plusieurs environnements thermiques dynamiques à l'aide des **SRE** et **SDF** ne sont pas sensibles à la valeur des paramètres choisis (*émissivité, coefficient de convection, exposant β*).

3.5 Spectre de dommage par fatigue

Les résultats du précédent calcul peuvent être exploités en procédant à un comptage des pics de la courbe décrivant le gradient thermique en chaque point de façon à pouvoir évaluer comme en mécanique une quantité proportionnelle au dommage par fatigue à partir de la courbe de Wöhler du matériau.

Dans le paragraphe 2.3, il a été montré comment le calcul de dommage par fatigue pouvait être effectué à partir de la loi de Coffin & Manson quand on considère que le matériau travaille dans le domaine oligocyclique avec des déformations plastiques. Par homogénéité avec les hypothèses retenues en mécanique pour la définition des SRE et SDF, nous considérerons ici que les contraintes résultant des cycles thermiques se situent dans le domaine d'endurance limitée pour lequel la courbe de Wöhler peut être représentée par la loi de Basquin

$$N \sigma^b = C$$

C, b = constantes caractéristiques du matériau.

N = nombre de cycles à la rupture pour une contrainte sinusoïdale d'amplitude σ

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$

n = nombre de cycles au niveau σ

$$D = \sum_i \frac{n_i \sigma_i^b}{C}$$

$$\sigma = K \frac{\delta T}{\delta x}$$

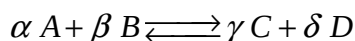
$$D = \frac{K^b}{C} \sum_i n_i \left(\frac{\delta T}{\delta x} \right)_i^b$$

Comme en mécanique, on peut calculer, en l'absence de données relativement aux constantes k et C , la quantité $\frac{C}{K^b} D$ suffisante pour comparer les effets de plusieurs sollicitations sur une même structure.

Le spectre de dommage est tracé en calculant $\frac{C}{K^b} D$ pour « a » variable dans un certain domaine.

3.6 Réaction chimique thermiquement activée

Etant donné un équilibre



dans lequel $-dn_A$ et $-dn_B$ moles de A et de B disparaissent dans le temps dt , tandis que dn_C et dn_D moles de C et D se forment, les variations de concentration sont définies par la relation :

$$-\frac{dn_A}{\alpha} = -\frac{dn_B}{\beta} = \frac{dn_C}{\gamma} = \frac{dn_D}{\delta} = d\lambda$$

On définit la vitesse de réaction par :

$$V = \frac{d\lambda}{dt}$$

L'expérience montre que dans un grand nombre de cas, la vitesse de réaction peut être écrite sous la forme

$$V = K C_A^{P_A} C_B^{P_B}$$

La somme des exposants $P_A + P_B$ a été nommée « ordre de la réaction » par R.C. Tolman et Kassel.

Pour une réaction du premier ordre par exemple,

$$-\frac{dc}{dt} = k c$$

Après un temps t , x molécules se sont transformées et la concentration qui était initialement égale à « a » devient $a - x$. D'où :

$$-\frac{dx}{da} = k (a - x)$$

et, en intégrant :

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{a}{a - x}$$

Dans le cas général,

$$\frac{dx}{dt} = k (a - x)^n$$

Le tableau 3 donne les expressions de k pour quelques valeurs de l'ordre de la réaction.

Ordre	Forme différentielle	k	Unité
0	$\frac{dx}{dt} = k$	$k = \frac{x}{t}$	mole/s
$1/2$	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)^{1/2}$	$k = \frac{2}{t} [a^{1/2} - (a-x)^{1/2}]$	mole ^{1/2} /s
1	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)$	$k = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{a}{a-x}\right)$	1/s
2	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)^2$	$k = \frac{1}{t} \frac{a}{a(a-x)}$	1/mole/s
3	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)^3$	$k = \frac{1}{2t} \frac{2ax - x^2}{a^2(a-x)}$	1/mole ² /s

Tableau 3 : Valeurs de k en fonction de l'ordre de la réaction

J.H. Van't Hoff et Arrhénius ont donné une relation entre la constante de vitesse et la température de la forme suivante :

$$k = B e^{-E/RT}$$

où R = constante des gaz parfaits

T = température absolue

E = énergie d'activation

E et B sont des constantes fonctions du type de réaction et des conditions expérimentales.

Soit y le pourcentage de molécules restant après un temps t. Si la réaction est du premier ordre,

$$k = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{a}{a-x}\right)$$

D'où

$$y = \frac{a-x}{a} = e^{-kt}$$

$$y = e^{-Bte^{-E/RT}}$$

Si l'environnement est composé d'une succession d'intervalles de temps t_i pour lesquels la température absolue est T_i , le pourcentage y de molécules restant à la fin de cette séquence est :

$$y = \exp\left[-B \sum_i t_i e^{-E/RT_i}\right]$$

Le tableau 4 donne l'expression de y pour des réactions jusqu'à l'ordre 3. On constate à l'examen de ce tableau que, quelque soit l'ordre, « y » varie en fonction du même terme $\sum_i t_i e^{-E/RT_i}$.

Plutôt que de travailler sur la valeur de y dont l'expression varie avec l'ordre de la réaction, on peut donc étudier simplement ce dernier terme (que nous nommerons « *index de réaction* ») pour caractériser la progression de la réaction en fonction des couples t, T de l'environnement.

Ordre	Expression de $y = \frac{a-x}{a} = \% \text{ molécules restant après } t, T$
0	$y = 1 - \frac{B}{a} \sum_i t_i e^{-E/RT_i}$
$\frac{1}{2}$	$y = \left(1 - \frac{B}{2\sqrt{a}} \sum_i t_i e^{-E/RT_i} \right)^2$
1	$y = \exp \left(-B \sum_i t_i e^{-E/RT_i} \right)$
2	$y = \frac{1}{1 - a B \sum_i t_i e^{-E/RT_i}}$
3	$y = \frac{1}{\sqrt{1 + 2a^2 B \sum_i t_i e^{-E/RT_i}}}$

Tableau 4: Valeurs du pourcentage de molécules restant en fonction de l'ordre de la réaction

3.7 Ecarts entre la réalité et les hypothèses sur les modèles retenus

Beaucoup de facteurs peuvent intervenir dans un environnement climatique : outre la température, la présence ou non d'humidité, la présence ou non d'une ambiance saline ou corrosive ... On ne s'intéresse dans cette méthode faisant appel aux SRE et SDF qu'aux variations de températures, cycliques ou non, susceptibles de générer dans les matériels des gradients thermiques et en conséquence des contraintes pouvant endommager les pièces soit par dépassement d'une valeur limite, soit par fatigue si le nombre de cycles est suffisamment élevé. Les autres facteurs, s'ils existent, ne sont pas pris en compte (bien qu'aggravants).

Le modèle simplifié retenu est un mur semi-infini dont la face libre est soumise à de l'air dont la température varie selon un profil donné. Ce modèle, simple, ne prétend pas représenter la structure réelle. Toutefois, l'exploitation des modèles de calcul montre que les gradients les plus grands se situent sur la peau du mur ou à une distance très proche. La taille de la structure n'intervient donc pas et seul le paramètre diffusivité est important pour caractériser la réponse du mur.

Les autres paramètres intervenant dans les calculs sont le coefficient de convection, l'exposant β et l'émissivité. Il a été précédemment noté que les résultats d'une comparaison de plusieurs environnements thermiques dynamiques à l'aide des **SRE** et **SDF** ne sont qualitativement pas sensibles au choix de la valeur de ces paramètres.

La validité de l'index de réaction chimique défini dans le précédent paragraphe est liée à celle de la loi d'Arrhenius. Cette loi a pu être vérifiée expérimentalement pour un grand nombre de réactions chimiques. Il s'agit d'une loi empirique basée sur les résultats observés expérimentalement dans un grand nombre de cas. Le seul paramètre intervenant ici est l'énergie d'activation E . Son choix a priori est sans conséquence dans la mesure où l'index n'est utilisé que pour des comparaisons entre plusieurs profils thermiques.

3.8 Etablissement de l'environnement à simuler

Un profil de vie est composé d'un ensemble de situations, chacune d'elles étant composée de un ou plusieurs « évènements ».

Le premier travail à effectuer consiste à réaliser une première synthèse de ces évènements situation par situation. Dans une situation donnée, le matériel subit successivement tous ces évènements.

3.8.1 Traitement de chaque évènement

La synthèse des données ne peut être effectuée que si l'on dispose d'un critère de comparaison des endommagements créés par plusieurs environnements thermiques. Si tel est le cas, il devient possible de remplacer plusieurs environnements par un environnement de synthèse de durée donnée qui produit les mêmes effets sur le matériel.

Le seul critère identifié dans ce Guide concerne les environnements thermiques dynamiques et ce n'est donc que pour ces seules sollicitations que sera proposée une méthode de synthèse.

L'environnement de chacun des évènements est le plus souvent décrit par une seule mesure (température en fonction du temps) et ce n'est que rarement que plusieurs mesures sont disponibles. Nous nous placerons toutefois dans ce dernier le cas plus général:-

Lorsque le nombre de mesures est suffisant, la démarche consiste à calculer les *SRE* et *SDF* thermiques de chacune des mesures.

Puis à procéder à une synthèse à caractère statistique destinée à remplacer l'ensemble des spectres par une seule courbe. Courbe qui inclue un coefficient de garantie fonction de la dispersion des spectres et de la variabilité de la résistance du matériel.

Cette synthèse est réalisée comme suit pour chaque évènement (cf. figure 6) :

- calcul du spectre « moyen » (moyenne des spectres à chaque fréquence) et de l'écart type des *SRE* d'une part et des *SDF* d'autre part,
- calcul du coefficient de variation (*rapport écart type / moyenne*, noté *CVE*) des *SRE* et des *SDF* en fonction de la fréquence pour l'évènement concerné,
- calcul pour des valeurs spécifiées de la probabilité de défaillance P_0 , du coefficient de variation de la résistance (*CVR*) et pour des lois de distribution données, du *coefficient de garantie* $k(f)$ à appliquer au spectre moyen. A noter que les valeurs numériques du *CVR* sont différentes pour les *SRE* et les *SDF*. En général, la dispersion du nombre de cycles à la rupture (dommages par fatigue) est beaucoup plus importante que celle de la contrainte à la rupture.

Sauf s'ils sont en très grand nombre, il est suffisant de calculer le *SRE* des chocs thermiques.

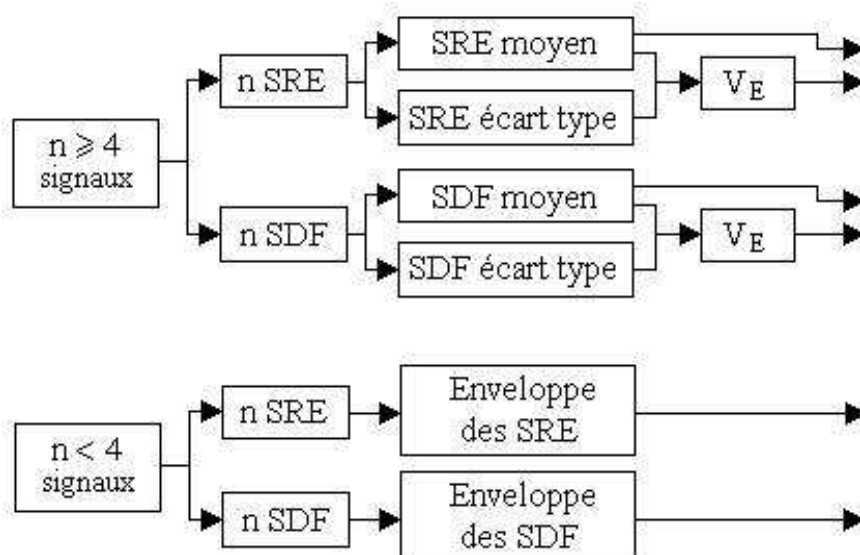


Figure 6 : Schéma de synthèse pour chaque événement

Si l'on ne dispose que de deux ou trois mesures, il n'est pas possible de déterminer les éléments statistiques. On trace alors simplement l'enveloppe des spectres et on lui applique un coefficient de garantie qui peut être soit « forfaitaire », soit obtenu à partir d'un calcul tenant compte de la variabilité de la résistance.

Nota :

Le calcul du CG par la méthode Résistance Contrainte suppose que l'on ait calculé une réponse caractéristique des effets de l'environnement à chacune des températures identifiées dans les données d'entrée (étape 2 du profil de vie).

En pratique, et mis à part les spectres SRE et SDF pour les environnements thermiques dynamiques, on ne dispose pas toujours d'un modèle permettant ce calcul.

Pour des températures variant lentement, on peut en première approximation se placer dans l'hypothèse où l'ensemble du matériel suit sans retard la température appliquée, ce qui autorise le calcul du CG directement sur les données « entrée ».

3.8.2 Critères de regroupement des évènements d'une situation ou synthèse de plusieurs situations

Les évènements ou les situations que l'on peut regrouper doivent répondre à certains critères :

- les environnements qui ont des amplitudes et des durées très différentes ne doivent pas être regroupés : par exemple, chocs thermiques et cycles journaliers,
- la configuration du matériel doit être semblable : conditions aux limites, fonctions du matériel activées,
- les combinaisons éventuelles d'environnement sont éventuellement à prendre en compte (vibrations et température).

3.8.3 Synthèse des évènements d'une situation

Lorsqu'une situation comporte plusieurs profils thermiques, le matériel, quelle que soit sa composition (soit sa diffusivité), doit être capable de supporter sans dégradation la plus grande des contraintes créées par tous ces profils, ce qui conduit à tracer l'enveloppe (synthèse avec coefficient de garantie) des *SRE* caractérisant chacun de ces événements (*figure 7*).

Les dommages créés par les cycles de contrainte thermomécanique sont par ailleurs supposés linéairement cumulatifs. Tous les événements d'une situation étant successivement subis par le matériel, le dommage par fatigue est égal à la somme des dommages créés par chacun des événements. Les *SDF* doivent donc être additionnés.

A l'issue de ces opérations, chaque situation est caractérisée par trois spectres : un *SRE* spécifique pour les chocs thermiques, un *SRE* et un *SDF* pour les autres événements.

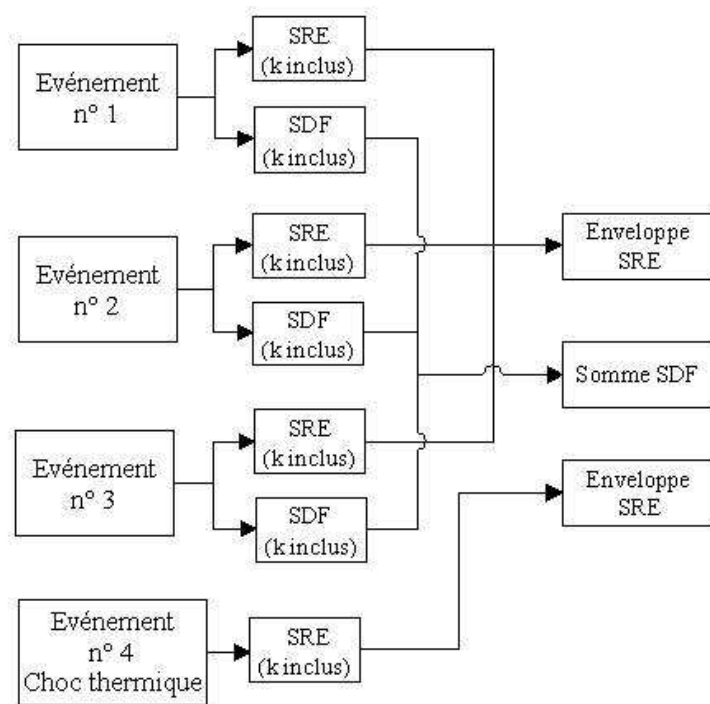
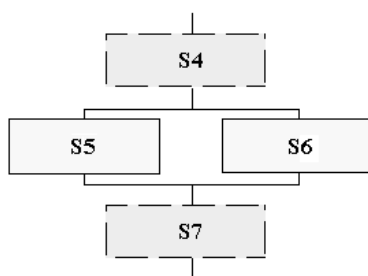
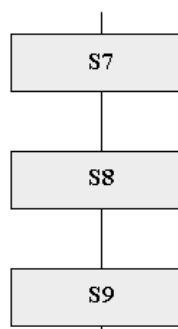


Figure 7 : Exemple de synthèse des événements

3.8.4 Synthèses de plusieurs situations

Etant données deux situations, deux cas principaux peuvent se présenter :

- Soit le matériel est soumis successivement à l'environnement de chacune des situations, qui se succèdent donc chronologiquement (situations « en série » cf. figure 8). Il faut donc effectuer :
 - o la somme des *SDF* caractéristiques de chaque situation,
 - o l'enveloppe des *SRE* des chocs thermiques,
 - o l'enveloppe des *SRE* des autres événements.



=>

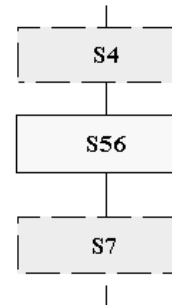


Figure 8 : Situations en série

Figure 9 : Traitement des situations en parallèle

- Soit le matériel est soumis à l'une ou l'autre des deux situations, mais jamais aux deux successivement (situations « en parallèle ») (figure 9). On détermine donc successivement l'enveloppe des SRE (en séparant les chocs thermiques) et des SDF des situations en parallèle. Les courbes obtenues sont donc considérées comme celles d'une situation équivalente en série avec les situations connexes.

L'ensemble du profil de vie peut ainsi être représenté par trois spectres équivalents (figure 10).

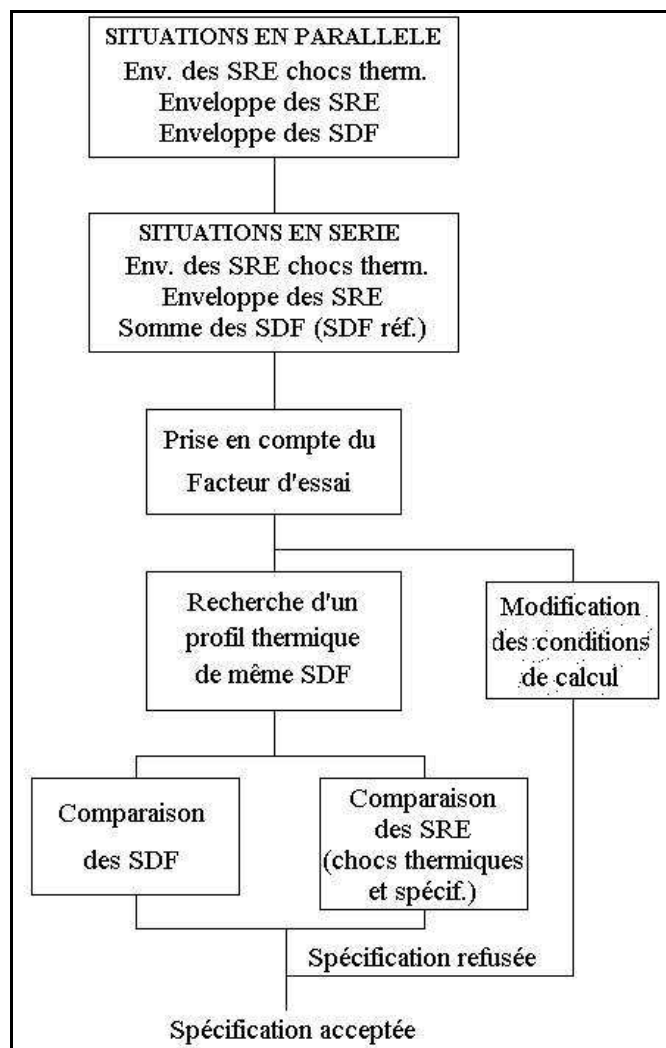


Figure 10 : Processus de validation de la spécification

3.8.5 Réduction et validation de la durée des essais

Considérons à titre d'exemple un profil de température sinusoïdal défini par n cycles de période T , dont les températures maximale et minimale sont respectivement égales à θ_{max} et θ_{min} .

Plusieurs stratégies sont possibles pour réduire la durée de l'essai :

La durée de la période est choisie égale à $T_R < T$ pour réduire la durée totale à $n T_R$ en conservant le même nombre de cycles. Cette réduction de durée se traduit par une augmentation des gradients thermiques (*et donc des SRE et SDF*). Pour conserver le même dommage par fatigue, on peut :

- soit diminuer la plage de variation de la température (θ_{min} , θ_{max}). Cette réduction peut être effectuée :
 - o en conservant la température moyenne des cycles,
 - o ou en conservant la température maximum θ_{max} , si l'on considère que le maintien de cette température est important pour respecter la sévérité de l'essai,
 - o ou au contraire en conservant la température minimale θ_{min} .

Dans tous ces cas, la réduction de la durée se fait sans coefficient d'exagération. Ce sont donc les méthodes à préférer.

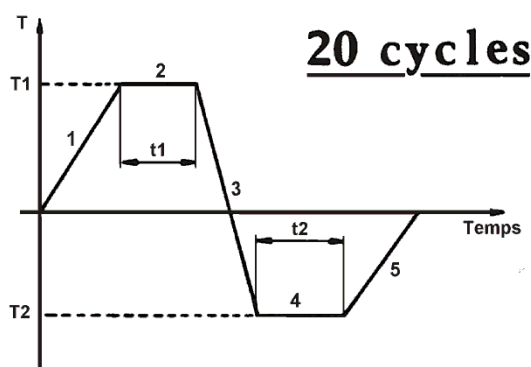
- soit, si l'on préfère conserver la plage $\Theta_{min}, \Theta_{max}$, en calculant :
 - o le nombre de cycles n pour une valeur donnée de la période (*l'équivalence ne porte ici que sur les SDF*)
 - o ou la valeur de la période pour un nombre de cycles donnés (*équivalence des SDF ou des SRE*).

3.9 Applications

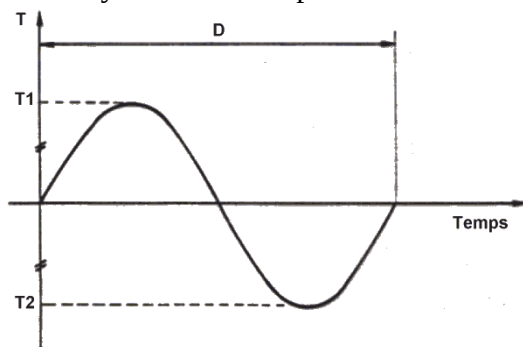
3.9.1 Comparaison des modes opératoires 1 et 2 de la norme GAM EG13, 1ère partie. Variations de température – Fascicule 6 (juin 1989)

Ce fascicule propose deux profils de température : l'un composé de paliers, l'autre présentant une variation continue de température avec un cycle sinusoïdal (figure 11).

Les valeurs des températures Θ_1 et Θ_2 retenues pour cet exemple sont $\Theta_1 = 125^\circ\text{C}$ et $\Theta_2 = 65^\circ\text{C}$ (Choix parmi les valeurs préférentielles).



Cycle du mode opératoire n°1



Cycle du mode opératoire n°2

Pour le cycle n° 1 : $t_1 = t_2 = 3$ heures
Vitesse de variation $5^\circ\text{C}/\text{min}$ (températures croissantes et décroissantes).

Pour le cycle n° 2 : $D = 24$ heures

Dans les 2 cas, l'essai comporte 20 cycles.

Les calculs ont été réalisés en supposant que le pilotage est effectué à partir de la température de l'air ambiant (pour $h = 1,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $\beta = 0,25$ et $\varepsilon = 0,8$).

On constate que (figures 12 et 13), dans ces conditions, la procédure 1 est nettement plus sévère que la procédure 2 sous les critères de réponse extrême et de dommage.

Index :

Procédure 1 : 9.10^6

Procédure 2 : 3.10^7

Figure 11 : Modes opératoires « Variations de température » de la norme GAM EG13

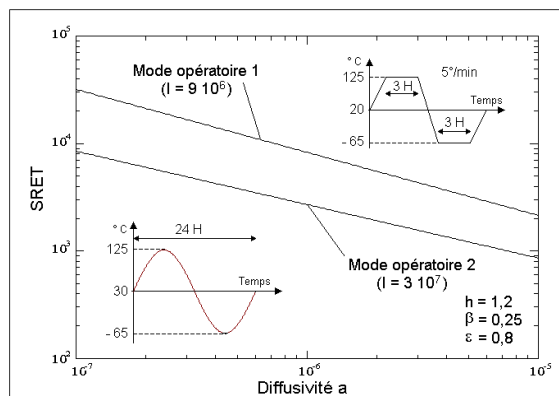


Figure 12 : Spectres de réponse extrême

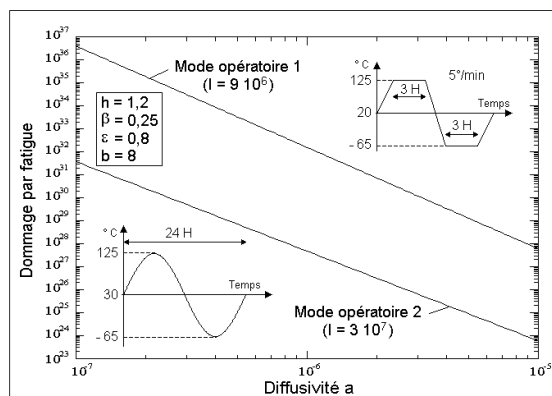


Figure 13 : Spectres de dommage par fatigue

3.9.2 Réduction de la durée à nombre de cycles constant

Une façon de réduire la durée peut consister à diminuer la période. Dans ce cas de l'exemple précédent, on peut ainsi établir que 20 cycles selon la procédure 2 ont la même sévérité en 20 cycles sinusoïdaux de période 6 h, valeur moyenne 75°C, amplitude $\pm 50^\circ\text{C}$ (figures 14 et 15).

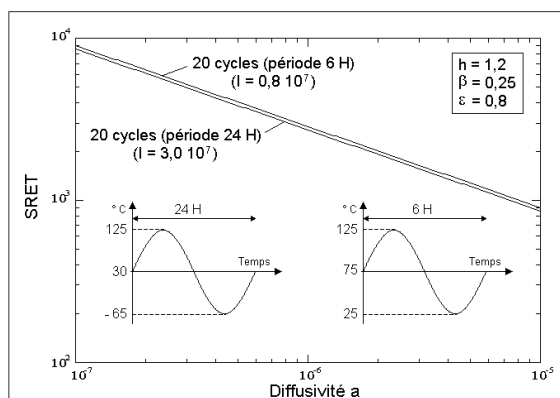


Figure 14 : Réduction de la durée

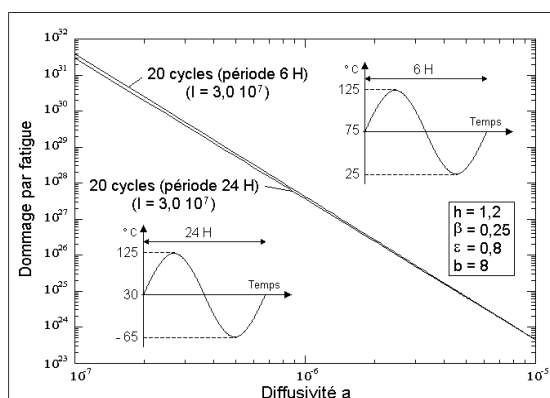


Figure 15 : Réduction de la durée

3.9.3 Elaboration d'une spécification d'essai

La figure 16 montre la température en fonction du temps, relevée autour d'un conteneur de transport d'un équipement lors d'un incendie d'hélicoptère après « crash ». Une spécification d'essai a été élaborée en recherchant un signal température-temps de forme simple dont le spectre de réponse extrême est très proche de celui du signal réel (figure 17). La figure 18 permet de comparer le signal réel et la spécification obtenue. Cette étude a permis de mettre en évidence la très grande sensibilité du spectre de réponse extrême à la durée du front de montée de la température.

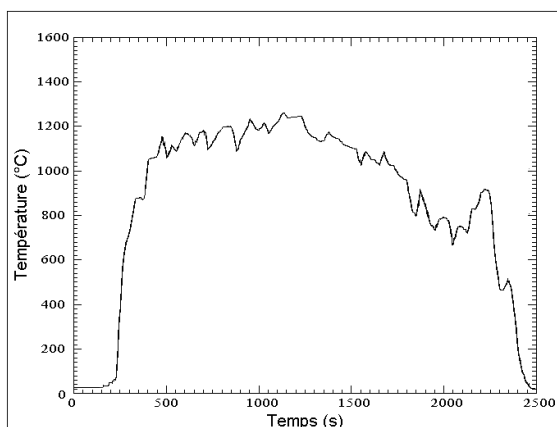


Figure 16 : Environnement réel
« Incendie »

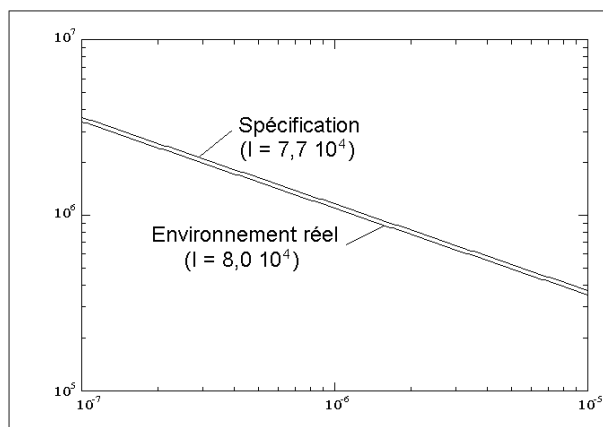


Figure 17 : Spectre de réponse extrême

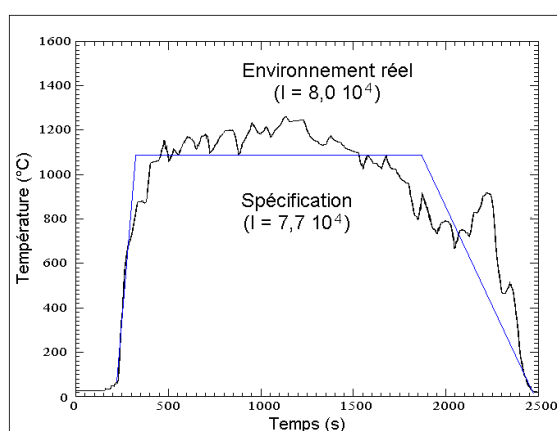


Figure 18 : Comparaison Spécification /
Environnement réel

4. PRISE EN COMPTE DES VARIABILITES

4.1 La variabilité des caractéristiques de l'environnement

Différentes causes sont responsables de la variabilité affectant la connaissance d'un environnement réel :

- Incertitudes concernant l'identification de la situation elle-même,
- Incertitudes sur les valeurs prises par les agents de l'environnement caractérisant la situation.

Les données caractérisant un environnement donné sont généralement obtenues au cours de campagnes de mesures dont les limitations ne permettent pas toujours d'atteindre les conditions les plus pénalisantes de chaque situation.

Les causes en sont multiples, parmi lesquelles on peut citer:

- le caractère aléatoire inhérent à l'environnement caractérisant une situation,
- des conditions météorologiques variables,
- des facteurs humains avec prise de risque variable, notamment au cours de phases transitoires réputées conduire à un environnement dégradant pour le matériel et diversement appréciées et/ou supportées par un éventuel opérateur humain.
- la variabilité des propriétés des structures assurant la protection thermique de certains matériels.

D'autres causes peuvent être responsables de l'incertitude affectant la connaissance de l'environnement réel:

- les incertitudes relatives aux chaînes de mesure ou d'exploitation,
- le niveau de confiance statistique attaché aux résultats du traitement.
- ...

Cas où l'environnement « entrée » est déterminé à l'aide d'un modèle numérique :

Si l'environnement « entrée » est défini par un calcul à l'aide d'un modèle (ambiance thermique lors d'un incendie par exemple), la variabilité de l'environnement prendra en compte les incertitudes liées à la précision du modèle numérique (hypothèses de la mise en équation, maillage, ...).

Cas où les données d'environnement ont été observées :

Une distribution des températures est connue: il peut s'agir des températures moyennes relatives à des périodes temporelles différentes (horaire, journalière, mensuelle, annuelle, diurne, nocturne, saisonnière,...).

Pour une période donnée, la connaissance des valeurs moyennes permet de définir les valeurs maximales (ou minimales) correspondant à des périodes de plus longue durée.

A une valeur extrême donnée, on peut faire correspondre une faible probabilité d'occurrence (1% par exemple) ou en d'autre terme, une période de retour élevée (par exemple 100 ans);

Dans ce dernier cas, on peut, en l'absence d'autres informations, définir l'environnement climatique par une seule valeur extrême considérée comme déterministe (coefficient de variation $CVe = 0$).

Les résultats ainsi obtenus n'incluent donc pas nécessairement les valeurs maximales susceptibles d'apparaître au cours du cycle de vie du matériel. Une évaluation réaliste nécessiterait de recueillir des informations complémentaires par répétition de plusieurs situations du même type.

Initialement, une situation ou un événement donné est généralement représenté par un signal temporel de température (ou de flux). Un tel signal peut être utilisé, par exemple, pour calculer un SRE et/ou un SDF.

Sauf cas très particulier où les conditions maximales de température sont parfaitement connues et maîtrisées, l'établissement d'une spécification d'environnement climatique à partir de données mesurées implique, en supposant la stationnarité des phénomènes, une caractérisation statistique de l'environnement réel.

Un facteur d'environnement peut être caractérisé statistiquement par diverses grandeurs, plus ou moins informatives.

Dans les cas les plus favorables, on peut accéder à une distribution statistique empirique ou théorique, définie par sa fonction de répartition ou sa densité de probabilité.

On peut alors en tirer aisément des valeurs caractéristiques telles que: valeur moyenne, coefficient de variation, coefficient d'asymétrie, valeurs dépassées avec une certaine probabilité, etc.

A minima, il est nécessaire d'accéder à des valeurs caractéristiques plus sommaires: valeur moyenne, coefficient de variation, bornes physiques limitant une plage d'appartenance.

Pratiquement, si l'on dispose d'un échantillon d'observations de chaque événement, dont la taille (n) est jugée suffisante, on pourra le caractériser statistiquement en fonction de ce qui précède :

- estimation de la loi de distribution empirique à partir des valeurs observées,
- assimilation de cette distribution empirique à une loi théorique adéquate,
- estimation de la valeur moyenne et de son encadrement pour un niveau de confiance donné (comme la distribution, l'intervalle de confiance peut être asymétrique),

En général, surtout quand la taille de l'échantillon est faible, plusieurs lois peuvent satisfaire la distribution empirique sur la base d'un critère de conformité statistique (par exemple la distance de Kolmogorov-Smirnov, facile à mettre en œuvre).

Dans ces conditions, un choix rationnel résulte à la fois de considérations physiques et de facilités d'utilisation ultérieures. On notera que les lois *normale*, *lognormale*, *Weibull*, dont l'utilisation est formalisée dans le cadre de la méthode résistance-contrainte ont, dans la plupart des cas, une représentativité suffisante.

Il convient de rappeler que la loi normale est moins bien adaptée que les autres pour représenter une température, car elle considère des valeurs négatives incompatibles avec le caractère positif de l'échelle absolue en degrés Kelvin (sauf cas particuliers d'une valeur moyenne associée à un faible coefficient de variation, justifiant une troncature de la loi au voisinage de l'origine).

Si la méthode de calcul de la spécification utilise les SRE et SDF thermiques, les statistiques correspondantes doivent être réalisées sur ces spectres, en particulier pour déterminer le coefficient de garantie.

Cas où les valeurs des températures sont issues de bases de données ou de répertoires

La distribution des températures est parfois extraite d'un document normatif, sous la forme des températures moyennes relatives à des périodes temporelles différentes (horaire, journalière, mensuelle, annuelle, diurne, nocturne, saisonnière,...). Pour une période donnée, la connaissance des valeurs moyennes permet de définir les valeurs maximales (ou minimales) correspondant à des périodes de plus longue durée.

A une valeur extrême donnée, on peut faire correspondre une faible probabilité d'occurrence (1% par exemple) ou en d'autre terme, une période de retour élevée (par exemple 100 ans); Dans ce dernier cas, on peut, en l'absence d'autres informations, définir l'environnement climatique par une seule valeur extrême considérée comme déterministe (coefficient de variation $CVe = 0$).

Nota : Si la méthode de calcul de la spécification utilise les SRE et SDF thermiques, les statistiques correspondantes doivent être réalisées sur ces spectres, en particulier pour déterminer le coefficient de garantie.

4.2 La variabilité des caractéristiques climatiques des matériels

Tous les exemplaires d'un matériel fabriqués selon une même spécification ne possèdent pas les mêmes limites de tenue dans l'ambiance climatique considérée. D'un exemplaire à l'autre, des écarts de valeurs existent et sont la conséquence :

- de la dispersion liée à l'inhomogénéité des matériaux,
- de la variabilité des constituants du matériel,
- des variabilités liées aux procédés de fabrication. (tolérances admises lors du dimensionnement et de la fabrication),
- des variabilités liées à la conception elle-même,
- etc.

Cette résistance limite du matériel est distribuée suivant une loi statistique qui peut être caractérisée par sa valeur moyenne et son écart type (ou par son coefficient de variation qui est le rapport écart type sur valeur moyenne).

Les défaillances peuvent avoir plusieurs origines, parmi lesquelles :

- le dépassement d'une température critique,
- une contrainte thermique instantanée trop élevée,
- une rupture par fatigue liée à l'accumulation de cycles de contraintes thermo-mécaniques.

Dépassement d'une température critique

Il s'agit d'une défaillance engendrée par le dépassement d'une valeur seuil de la température admissible dans une zone sensible du matériel, ce seuil pouvant être, par exemple :

- la température au-delà de laquelle les propriétés mécaniques sont dégradées de manière inacceptable,
- la température de fusion d'une composition pyrotechnique,
- la température d'ébullition d'un liquide dans un réservoir,
- la température qui conduit à une pression non admissible dans un réservoir,
- la température qui conduit à une performance en limite d'acceptation,
- ...

En fonction du mécanisme physique intéressé, l'effet est lié à une durée d'application supposée suffisante pour que la défaillance apparaisse et que l'on puisse considérer une distribution statistique indépendante du temps.

Selon le cas, on choisira la loi la plus représentative (*log-normale*, *Weibull*, ...). Les températures absolues exprimées en *Kelvin* ne pouvant prendre des valeurs négatives, l'utilisation de la loi normale n'est acceptable que si les coefficients de variation sont suffisamment faibles ($CV < 1/3$ environ).

Défaillance par fatigue thermo-mécanique

Il s'agit d'une défaillance résultant du cumul de l'endommagement provoqué par un environnement cyclique de longue durée ou par une succession de chocs thermiques.

La relation entre la contrainte (résultant d'un gradient thermique) et le nombre de cycles à rupture peut être représentée par un réseau de courbes probabilisées (*courbes de Wöhler*) qui dépend à la fois du matériau (nature, forme, état de surface...) et des caractéristiques des sollicitations (sinusoïdales, à moyenne non nulle, combinées...). Selon la plage des températures considérées, elle peut aussi dépendre de ce paramètre.

L'expérience a montré que l'endurance à la fatigue de la plupart des matériaux suit une loi *log-normale* ou une loi de *Weibull*, suivant le nombre de cycles considéré.

Comme précédemment ceci n'est qu'une orientation et d'autres lois spécifiques, plus représentatives du cas étudié peuvent être envisagées.

On peut souvent trouver dans la littérature des valeurs du coefficient de variation de la résistance quand il concerne une propriété thermique d'un matériau. Il peut arriver que ce paramètre ne soit pas connu, mais qu'il soit accessible expérimentalement sans devoir procéder à des essais destructifs car trop coûteux (par exemple: cas d'une performance sensible à la température).

Des essais réalisés sur des productions précédentes peuvent donner un ordre de grandeur réaliste de ce paramètre.

4.3 Coefficient de garantie

Le coefficient de garantie est un facteur multiplicatif appliqué à la moyenne de l'environnement. Il permet de tenir compte des variabilités de l'environnement et de la résistance du matériel et définir la sévérité de l'essai.

Si le matériel supporte sans dommage l'essai effectué avec cette sévérité, le matériel étudié supportera sans dommage les contraintes de l'environnement réel avec une probabilité de défaillance inférieure à une valeur spécifiée. Cette probabilité de défaillance fait partie des spécifications fournies par le maître d'ouvrage.

Le coefficient de garantie CG est défini par le rapport des valeurs moyennes :

$$CG = \frac{\mu_r}{\mu_e}$$

où

μ_e est la moyenne de la distribution de la contrainte,

μ_r est la moyenne de la distribution de la résistance

Pf est la probabilité de défaillance.

Les hypothèses et la formulation mathématique qui conduisent aux expressions du coefficient de garantie en fonction des lois statistiques considérées pour les distributions sont développées dans le **Guide d'Application de la Démarche de Prise en Compte de l'Environnement Mécanique**.

Le tableau 5 rappelle les relations obtenues pour ce coefficient. A l'inverse, il peut être utile de calculer la probabilité de défaillance à partir des caractéristiques des distributions de l'environnement et de la résistance (*moyennes et coefficients de variation des lois*). Ce même tableau rappelle les expressions de cette probabilité.

Notations :

CV_e = coefficient de variation de l'environnement

CV_r = coefficient de variation de la résistance

Lois Charge et Résistance	Coefficient de garantie	Remarques	Probabilité de défaillance
Normales	$CG_n = \frac{1 + \beta_n \sqrt{(CV_e^2 + CV_r^2) - (\beta_n CV_e CV_r)^2}}{1 - \beta_n^2 CV_r^2}$	$CV < 1/3$ $-\beta_n = \Phi^{-1}(Pf_n)$ $\Phi(.) = \text{Loi normale}$	$Pf_n = \Phi \left(- \frac{(CG_n - 1)}{\sqrt{(CG_n CV_r)^2 + CV_e^2}} \right)$
	Relation approchée : $CG_n \gg \frac{(1 + \beta_n \times CV_e / \sqrt{2})}{(1 - \beta_n \times CV_r / \sqrt{2})}$	Erreur < 10% pour Cve < 1/3, CVr < 1/6) et Pf > 10 ⁻⁵ $-\beta_n = \Phi^{-1}(Pf_n)$ $\Phi(.) = \text{Loi normale}^{(1)}$	
Log-normales	$CG_{ln} = \sqrt{\frac{(1 + CV_r^2)}{(1 + CV_e^2)}} \exp \left[\beta_n \sqrt{\text{Log} \left[(1 + CV_r^2) (1 + CV_e^2) \right]} \right]$		$Pf_{ln} = \Phi \left(- \frac{\ln \left(\frac{CG_{ln}}{\sqrt{(1 + CV_r^2) / (1 + CV_e^2)}} \right)}{\sqrt{\ln \left[(1 + CV_r^2) (1 + CV_e^2) \right]}} \right)$
Weibull	$CG_w \approx \frac{\Gamma(1 + (1/\beta_r))}{\Gamma(1 + (1/\beta_e))} \left(\frac{\Gamma(1 + (\beta_r/\beta_e))}{(Pf_w)} \right)^{1/\beta_r}^{(2)}$	$1 + CV_i^2 = \frac{\Gamma(1 + 2/\beta_i)}{\Gamma^2(1 + 1/\beta_i)}$	$Pf_w = \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{\Gamma(k+1)} (\eta_e/\eta_r)^{(k\beta_r)} \Gamma[1 + k(\beta_r/\beta_e)]$

Tableau 5 : Expressions du coefficient de garantie

⁽¹⁾ Quelques valeurs caractéristiques de β_n sont indiquées dans le tableau 6. ⁽²⁾ $\Gamma()$ = Fonction intégrale Gamma complète

Pf	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
β_n	2.3263	3.0902	3.7190	4.2649	4.7534

Tableau 6: Valeurs de β_n pour des probabilités de défaillance usuelles

Exemples

Données	Distributions	Coefficient de garantie
$Pf_n = 10^{-3}$ $CVe = 1/3$ $CVr = 1/6$ $-\beta_n = \Phi^{-1} \left(10^{-3} \right) = -3,090$	Normales	2,752 (Formule simplifiée : 2,718)
	Log-normales	2,965
	Weibull	3,117

4.3.1 Conditions d'application de la méthode de calcul du coefficient de garantie

Le coefficient de garantie obtenu à partir de la méthode résistance contrainte a pour but de prendre en compte la variabilité de l'environnement et de la résistance du matériel à l'environnement dans le choix des valeurs retenues pour élaborer la sévérité d'essai.

Formellement, la mise en œuvre de la méthode résistance et contrainte implique une interaction probabiliste entre deux grandeurs de même nature et définies avec la même unité de mesure.

Mais dans la pratique, les essais ne permettent pas toujours d'accéder à la contrainte effectivement appliquée au matériel. Celle-ci dépend de la sollicitation d'essai à laquelle elle est reliée par une fonction spécifique du processus physique considéré.

Toutefois, la condition d'application précédente de la méthode résistance et contrainte peut être relâchée dans le cas particulier où l'on s'intéresse à la détermination du coefficient de garantie.

S'il n'est pas nécessaire de connaître la valeur moyenne de la résistance (son coefficient de variation suffit), par contre il est nécessaire de connaître la relation qui lie explicitement la sollicitation appliquée lors de l'essai à la contrainte effectivement appliquée au matériel. Dans ces conditions, par une transformation adéquate on peut assurer la proportionnalité entre la sollicitation d'essai et la contrainte effective appliquée au matériel. (La connaissance du coefficient de proportionnalité n'est pas nécessaire).

La démarche suppose donc de choisir correctement la grandeur représentative de l'environnement réel. Par exemple :

- dans le domaine mécanique, la défaillance d'un emballage qui chute par gravité résulte d'une contrainte interne qui pourrait être suivant les cas, proportionnelle à la

vitesse d'impact ou à la hauteur de chute, qui sont des grandeurs mesurables lors des essais,

- dans le domaine biomédical, la défaillance majeure d'un certain type de stimulateur cardiaque implanté dans la poitrine de nombreux patients a été identifiée; l'isolant électrique d'un fil de connexion constitué par une gaine en téflon tend à fluer dans une courbure du fil et finit par s'en séparer (cas réel rencontré). Si le modèle de fluage du téflon placé dans un milieu organique est mal connu au stade d'un avant-projet, l'approche résistance - contrainte n'est pas applicable.

Une analyse préliminaire de la situation doit donc être engagée systématiquement afin de définir le mécanisme de défaillance et les grandeurs qui le caractérisent.

Dans le domaine climatique, on ne rencontre pas seulement des défaillances par dépassement d'une grandeur mais des dérives de caractéristiques pouvant conduire à une dégradation des performances, voire à une défaillance fonctionnelle.

Dans le cas d'une performance sensible à la température, cette proportionnalité pourrait être vérifiée. Par exemple en traçant un graphe performance de la fonction considérée par rapport à la température à partir d'essais non destructifs.

Par ailleurs, il est important de vérifier que l'amplitude de la sollicitation appliquée au matériel est suffisamment en deçà de la zone de défaillance afin que le mécanisme considéré ne soit pas affecté (par exemple au voisinage d'une température de fusion, les phénomènes de changement d'état sont souvent non linéaires et restent non caractérisés).

Cette réserve ne devrait pas être pénalisante, puisqu'il est a priori fortement déconseillé d'utiliser un matériel dans une plage proche de ce seuil.

4.3.2 Choix de l'unité des températures

Lorsque le paramètre significatif est la température, la question peut se poser du choix de l'unité : degrés Celsius, degrés Fahrenheit, Kelvin,... On rappelle que la correspondance entre ces unités est la suivante :

$$T_{kelvin} = T_{Celsius} + 273,15$$

$$T_{kelvin} = \frac{5}{9}(T_{Fahrenheit} + 459,67)$$

$$T_{Fahrenheit} = \frac{9}{5}T_{kelvin} - 459,67$$

$$T_{Fahrenheit} = \frac{9}{5}T_{Celsius} + 32$$

$$T_{Celsius} = \frac{5}{9}(T_{Fahrenheit} - 32)$$

Selon le choix de l'unité de température, le coefficient de variation de l'environnement thermique considéré et celui de la résistance du matériel à cet environnement ont des valeurs numériques différentes qui conduisent donc à des coefficients de garantie et à des sévérités d'essais différents. Cette absence d'unicité impose de définir et d'utiliser une échelle de température adéquate.

Si l'on définit les températures dans un premier repère (T) avec leur moyenne $\bar{T}$ et leur coefficient de variation CV_T , on peut calculer à partir des précédentes relations le coefficient

de variation CV_{θ} de ces mêmes températures exprimées dans un second repère d'unité (θ) tel que $\theta = a T + b$ (où a et b sont des constantes) à partir de

$$CV_{\theta} = \frac{CV_T}{1 + \frac{b}{a \bar{T}}}$$

Exemple :

Soit un coefficient de variation calculé à partir de relevés en degrés Celsius. On souhaite connaître la valeur de ce coefficient que l'on obtiendrait à partir de mesures en Kelvin :

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ b &= 273,15 \\ CV_T &= 0,10 \\ \bar{T} &= 30^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

D'où

$$CV_{\theta} = \frac{0,10}{1 + \frac{273,15}{30}} \approx 0,01$$

A noter que la température moyenne intervient dans cette relation.

Les degrés Celsius et Fahrenheit correspondent à des échelles de température établies de manière arbitraire en considérant deux points, la température de solidification et d'ébullition d'un corps : 0°C et 100°C pour l'eau pour l'échelle Celsius avec *100 divisions* pour définir le degré, 32° et 212° pour l'eau dans le cas de l'échelle Fahrenheit avec *180 divisions* entre ces deux valeurs. Il ne s'agit que d'échelles, de repères.

On dit que ce sont des grandeurs « repérables », pour lesquelles l'addition algébrique et la multiplication par un scalaire, ne peuvent être définies. Appliquer un facteur multiplicatif k sur une température exprimée dans ces unités n'a donc pas de sens et ne garantit pas un effet k fois plus grand. L'existence de valeurs négatives et d'une valeur zéro poserait par ailleurs un problème dans le calcul du coefficient de variation dans le cas où la moyenne serait égale à zéro.

A la différence du degré Celsius, le Kelvin est une mesure absolue de la température qui a été introduite grâce au troisième principe de la thermodynamique. La notion de température thermodynamique, et implicitement celle de température absolue, introduisent la notion de zéro absolu ($0 \text{ Kelvin} = -273.16^{\circ}\text{C}$), rendant inutile la référence à deux points. Un seul point fixe de référence suffit (le point triple de l'eau, qui est à la température $0,01^{\circ}\text{C}$). Ce point unique définit un état d'énergie bien spécifique de la matière. Le Kelvin introduit la notion d'état d'énergie de la matière avec la valeur 0 K comme limite théorique jamais atteignable et qui correspondrait à un niveau d'énergie absolument nul de la matière.

L'intervalle de un Kelvin est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Par définition, l'unité de température Celsius est donc égale à l'unité de température Kelvin : tout intervalle de température a donc la même valeur numérique dans ces deux systèmes.

La température exprimée en Kelvin est une grandeur « mesurable », pour laquelle le rapport de deux températures et la multiplication par un scalaire sont bien définis. A titre d'exemple, il suffit de considérer l'équation des gaz parfaits $P V = n R T$ pour vérifier que multiplier par deux la température T (qui est en K) conduit bien à doubler le produit $P V$.

De ce fait, il est légitime d'appliquer un coefficient de garantie sur une température exprimée en degrés Kelvin. Cette unité doit être utilisée pour déterminer les coefficients de variation et les sévérités d'essai qui en résultent.

Lorsque le paramètre significatif est lié à une différence de température (gradient par exemple), il est indifférent d'utiliser des degrés Kelvin ou Celsius puisque l'unité est la même. Par contre, les degrés Fahrenheit doivent préalablement être convertis en Kelvin.

Nota : les valeurs des températures en Kelvin sont toujours positives. La loi normale, qui présente des valeurs négatives sur sa gauche, ne peut donc, théoriquement, pas être utilisée pour représenter une distribution de températures. En fait, si $CV < 1/3$, elle est utilisable, la troncature à 3 *écart-types* entraînant une erreur négligeable (mais cette contrainte est pour le moins restrictive et souvent peu réaliste compte tenu de la variabilité des grandeurs climatiques).

4.3.3 Modalités de détermination du coefficient de garantie

La détermination du coefficient de garantie peut être réalisée à partir de données différentes selon l'utilisation prévue pour la sévérité d'essai :

- pour un essai, la résistance du matériel doit être caractérisée par une distribution statistique et un coefficient de variation,
- pour un calcul, on prendra en compte la variabilité des caractéristiques des matériaux, celle liée au modèle numérique (maillage, ...) et l'incertitude qui peut affecter la définition du matériel au cours du temps.

5. ESTIMATION DU COEFFICIENT DE VARIATION ASSOCIE A UNE TEMPERATURE EXTREME MAXIMALE

5.1 Contexte

L'élaboration du Guide Climatique est orientée vers la personnalisation des essais, comme c'est aussi le cas du guide mécanique.

Cependant, les variables climatiques sont à la fois plus nombreuses et plus diversifiées que les variables mécaniques.

Dans ces conditions, la transposition au domaine climatique de la méthode résistance - contrainte développée dans le domaine mécanique doit être étudiée pour chaque ambiance.

On examine ci-après le cas d'une sollicitation thermique définie par une température extrême maximale observée au cours du mois réputé le plus chaud (ou le plus froid).

5.2 Problématique

Si la défaillance d'un équipement dépend à la fois :

- de sa résistance intrinsèque (à une sollicitation d'environnement)
- de la contrainte résultant de cette sollicitation d'environnement,

alors la méthode résistance - contrainte permet de déterminer sa probabilité de défaillance, connaissant les distributions statistiques et les coefficients de variation de la résistance et de la contrainte.

La défaillance peut intervenir au sens large lorsqu'une performance atteint sa limite (haute ou basse) d'acceptation sous l'effet d'un agent environnement auquel elle est sensible.

L'inversion de la démarche conduit à estimer un dimensionnement compatible avec une probabilité de défaillance assignée et un risque de dépassement donné.

Lorsque la contrainte est une température maximale, le présent Guide Climatique renvoie pour les données atmosphériques au niveau du sol à **l'AECTP 2311** qui considère qu'il s'agit d'une valeur extrême maximale correspondant au mois le plus chaud (ou le plus froid) de l'année et dont la probabilité de dépassement est de 1%. Cette valeur conventionnelle est admise depuis longtemps, sachant qu'à ce faible niveau de risque est associé une période de retour centennale, nettement supérieure à la durée de vie des équipements considérés.

La question se pose de savoir comment utiliser ce type d'information dans le cadre de la méthode résistance - contrainte.

5.3 Contexte déterministe

Si l'on ne disposait que de la valeur extrême en question, on pourrait considérer que la contrainte est une variable aléatoire dont le coefficient de variation s'annule (elle se réduit à un Dirac).

Cette contrainte étant alors purement déterministe, la méthode résistance - contrainte pourrait être mise en œuvre très simplement, puisque la probabilité de défaillance correspond à un quantile particulier (cf. la valeur déterministe de la contrainte) de la distribution de la résistance.

L'approche probabiliste et sa formulation resteraient donc valables, la seule variabilité prise en compte étant celle associée à la résistance de l'équipement (Cvr).

5.4 Contexte statistique

En réalité, cette contrainte de température est une valeur extrême à laquelle est attachée une inévitable dispersion qu'il est souhaitable d'estimer. Mais ceci implique d'accéder à des informations complémentaires et d'admettre certaines hypothèses.

A priori, deux approches différentes sont envisageables.

5.4.1 Utilisation des quantiles extrêmes

On admet que cette valeur extrême est le quantile d'une distribution asymptotique des valeurs extrêmes maximales, engendrée par une distribution parente capable de traduire la variabilité des chroniques de températures observées.

Comme la variabilité de la distribution asymptotique est d'autant plus faible que le rapport entre les périodes d'observation globale et élémentaire est important (une période mensuelle est composée de 730 observations horaires), on peut admettre que ce quantile est une variable aléatoire normale.

Compte tenu des hypothèses précédentes, l'estimation des deux paramètres de la distribution des valeurs extrêmes maximales implique d'avoir accès à au moins deux quantiles différents. En effet, l'écart-type de la loi des valeurs extrêmes est fonction des deux paramètres de cette loi.

Puisque le quantile auquel on s'intéresse (1%) est une donnée, il suffirait d'en connaître un autre (par exemple: 5%). Malheureusement, les documents de référence (AECTP-2311 par exemple) ne fournissent pas systématiquement ces informations et ne permettent pas de les reconstituer facilement.

Cette approche n'est donc pas directement exploitable avec les données **AECTP** disponibles.

5.4.2 Reconstitution de la distribution extrême

On peut reconstituer la distribution des valeurs maximales de la façon suivante en utilisant les **données du tome 6 «Annexe Modèles et Données d'Environnement»**.

Pour 10 zones climatiques (Z1 à Z10), on dispose simultanément des valeurs extrêmes maximales et minimales relatives à des périodes comprises entre 1 jour et 365 jours (1 an). L'obtention du coefficient de variation correspondant à des valeurs extrêmes ayant une probabilité d'occurrence de l'ordre de 1% implique que les données disponibles fournissent 2 quantiles encadrant le plus étroitement possible cette faible probabilité.

Or nous disposons des valeurs extrêmes correspondant à deux périodes successives, de 1 jour et 10 jours, auxquelles correspondent des probabilités comprises entre $1/365 = 0.274 \%$ et $10/365 = 2.74 \%$, soient: $(0.274 \% < 1.00 \% < 2.74 \%)$.

On dispose donc de 2 températures ($\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$) en degrés Celsius et des 2 probabilités correspondantes (p_1, p_2), sachant que ($\hat{\theta}_1 > \hat{\theta}_2$) et que corrélativement ($p_1 < p_2$)

- on transforme les températures de °C en Kelvin, soit : $\hat{T}_i(K) = \hat{\theta}_i(^{\circ}C) + 273.15$
- on calcule l'écart: $\Delta \hat{T} \equiv \Delta \hat{\theta} = (\hat{T}_1 - \hat{T}_2)$

- on calcule: $C_i(p_i) = \text{Log}\{-\text{Log}[1/(1-p_i)]\}$

Un léger majorant du coefficient de variation de la valeur extrême correspondant à une probabilité de dépassement *de l'ordre de 1%* est donné par la relation:

$$CV_e \approx (\pi/\sqrt{6}) \cdot [\Delta\hat{T}/(C_1 \cdot \hat{T}_2 - C_2 \cdot \hat{T}_1)]$$

Les tableaux ci-dessous (*valeurs maximales TMA & minimales TNA*) récapitulent pour les différentes zones considérées (Z1 à Z10), les CV identifiés à partir des TMA/TNA correspondants (nombre jours/an de dépassement),

Ci-dessous, 2 tableaux (7 et 8) récapitulatifs des CV associés aux valeurs extrêmes (min, max) à 1%, correspondant aux zones Z1 à Z10 des données en question :

ZONE Tome 6	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
CV max	0.21 %	0.11 %	0.43 %	0.38 %	0.21 %	0.48 %	0.51 %	0.85 %	0.78 %	0.81 %

Tableau 7 : CV associés aux valeurs maximales (TMA)

Nota :

- valeur Z2 peu significative : écart température entre quantiles *inférieur à 1°C*
- valeur moyenne *de l'ordre de 0.5 %* (pour une température en Kelvin)

ZONE Tome 6	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
CV max	0.88 %	0.76 %	0.54 %	0.74 %	0.32 %	0.78 %	1.29 %	1.93 %	1.80 %	1.95 %

Tableau 8 : CV associés aux valeurs minimales (TNA)

Nota :

- valeur moyenne de l'ordre de 1 % (pour une température en Kelvin),
- en gros, les CV associés aux valeurs extrêmes minimales sont le double des CV correspondant aux valeurs maximales,
- les CV associés aux valeurs extrêmes sont généralement faibles et peu dispersés, ce qui est logique car on propage la variance constante d'une population mère à travers des lois extrémales dont les quantiles augmentent de façon monotone (mais non

linéairement) avec le nombre d'observations (Ceci résulte du fait que l'écart-type associé à la distribution parente se propage à travers la distribution extrême et diminue en fonction de (n), alors que corrélativement, le quantile augmente en fonction de (n)),

- on observe que les distributions des températures minimales (souvent négatives quand elles sont exprimées en °C) sont généralement plus dispersées que celles des valeurs maximales,
- ces valeurs estimées sur TMA/TNA des zones du tome 6, ne correspondent pas nécessairement aux définitions et conditions spécifiées dans l'AECTP 2311,
- toutefois, on pourrait considérer que les ordres de grandeur sont les mêmes, sachant que l'AECTP 2311 considère des valeurs dépassées avec une probabilité de 1% (soit un niveau de risque conventionnel qui a le mérite d'assurer la cohérence de l'approche),
- dans ces conditions, l'ordre de grandeur des CV est de 1% et, faute de données disponibles ou exploitables, on pourrait retenir forfaitairement: CV (max chauds) = 0.5 % et CV(min froid) = 1%.

Exercice d'application

Cette approche forfaitaire concernant les coefficients de variation des températures extrémales a été appliquée aux données disponibles dans le document (*AECTP-2311*).

On se réfère à sa **table 1** et aux hypothèses suivantes concernant l'approche résistance - contrainte:

Probabilité de défaillance spécifiée: 0.1% ; nombre d'essais : 1 ; niveau de confiance : 90 % ;
CVe et CVr : cf. tableau 9 ; lois normales pour l'environnement et la résistance

	Chaud		Froid	
	CVe %	CVr %	CVe %	CVr %
Hyp 1	0.5	1	1	1
Hyp 2	0.5	0.5	1	0.5
Hyp 3	0.5	0	1	0
Hyp 4	0	0	0	0

Tableau 9: Exemples de CVe et CVr

Le tableau 10 récapitule :

- La valeur de la température donnée dans la table 1 du document AECTP-2311
- le coefficient de garantie CG
- le facteur d'essai FE
- le produit CG * FE
- la sévérité d'essai

TABLE		Cycle A1	Cycle C4
$Max(\theta_j)$		+49.00 °C 322.15 K	-57 °C 216.15
Coeff. de garantie CG	hyp1	1.036	1.045
	hyp2	1.022	1.035
	hyp3	1.015	1.031
	hyp4	1	1
Facteur d'essai FE	hyp1	1.013	1.013
	hyp2	1.006	1.006
	hyp3	1	1
	hyp4	1	1
CG*FE	hyp1	1.049	1.058
	hyp2	1.029	1.041
	hyp3	1.015	1.031
	hyp4	1	1
Sévérité d'essai	hyp1	337.93 K	206.84K
		64.78°C	-66.3°C
	hyp2	329.23K	208.84K
		56.08°C	64.31°C
	hyp3	326.98K	209.65K
		53.83°C	63.50°C
	hyp4	322.15K	216.15K
		49°C	-57°C

Tableau 10: Exemples de calculs du coefficient de garantie, du facteur d'essai et de la sévérité d'essai

5.5 CONCLUSIONS

A défaut d'information plus pertinente, on suggère, lorsque l'application du coefficient de garantie se justifie, d'utiliser pour le coefficient de variation :

- C_{Ve} des extrêmes de la température, une valeur forfaitaire de C_{Ve} = 0.5 % pour l'extrême chaud et C_{Ve} = 1% pour l'extrême froid
- C_{Vr} de la résistance de l'équipement à la température : de préférence une valeur connue de ce paramètre. Si elle n'est pas connue, on pourra éventuellement utiliser une valeur forfaitaire de 1% : ce qui signifie par exemple que 64% des équipements auraient une performance sensible à la température qui arriverait en limite acceptable à $(273+100) \pm 3.7$ K, en supposant une valeur moyenne de cette limite à 100 °C. Ce qui signifie que parmi une population de composants pouvant résister à une *température moyenne* de 100°C (373 K) et affectés d'un C_{Vr} de 1% (3.73 K), environ 16% d'entre eux seraient défaillants et seulement 84 % pourraient survivre à cette température de 100 °C.

6. METHODES DE SYNTHESE

6.1.1 Méthode basée sur les distributions de températures.

L'exemple suivant concerne un équipement dont le cycle de vie le conduit à fonctionner dans les zones A3 et C1 de Toulon et Strasbourg. On s'intéresse à la température élevée (décrite par A3) et le diagramme séquentiel des situations représenté sur la figure 19 implique de considérer successivement deux combinaisons possibles de situations, chaque situation ayant une durée de 15 ans:

- Strasbourg et Toulon « en parallèle »,
- Strasbourg et Toulon « en série » ;.

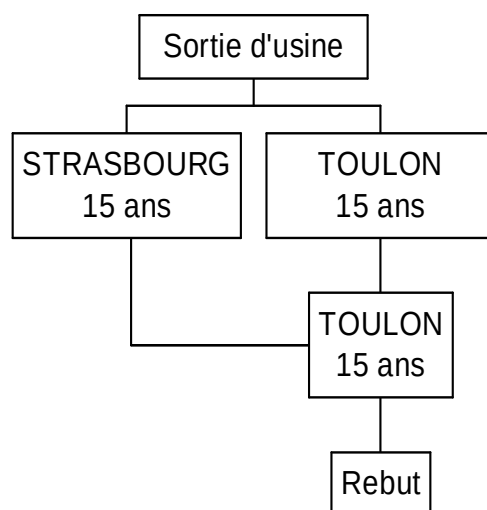


Figure 19: Exemple de profil de vie

Situation « en parallèle » :

L'équipement doit pouvoir supporter l'un ou l'autre de ces deux climats et il faut donc déterminer la courbe enveloppe des distributions de température relatives à ces deux villes qui représente les valeurs maximales auxquelles il sera soumis pendant 15 ans

- Enveloppe des histogrammes de répartition (= cumulées), c.-à-d. « nombre d'heures par an pour lesquelles la température atteint ou dépasse une température donnée »
- Principe : la situation la plus contraignante est définie, pour une température donnée, comme le lieu où cette température est atteinte ou dépassée pendant le plus grand nombre d'heures

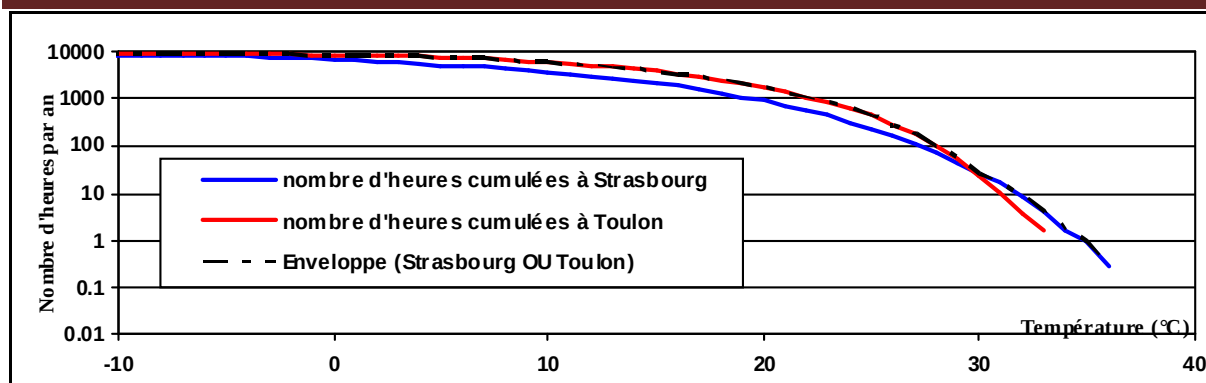


Figure 20: Nombre d'heures cumulées

La répartition des températures est la suivantes: pour une température égale ou supérieure à -10°C il y a 10 000 heures pour les 2 villes et, pour une température égale ou supérieure à 35°C il y a 1 heure 0.3 h à Toulon pour 1h à Strasbourg.

Le matériel doit donc pouvoir supporter l'enveloppe de ces températures. Cette enveloppe se compose de la composante Toulon jusqu'à environ 30°C puis de la composante Strasbourg depuis environ 30°C jusqu'à 38°C (valeur statistique maximale enregistrée à Strasbourg).

Situation « en série » :

L'équipement va fonctionner pendant 15 ans dans chacune de ces deux villes. Il doit donc supporter les températures extrêmes de ces deux villes mais, contrairement à la situation précédente, ce n'est plus l'enveloppe des distributions de température qu'il faut déterminer mais le cumul des heures correspondant à une température quelconque, située dans la plage précédente.

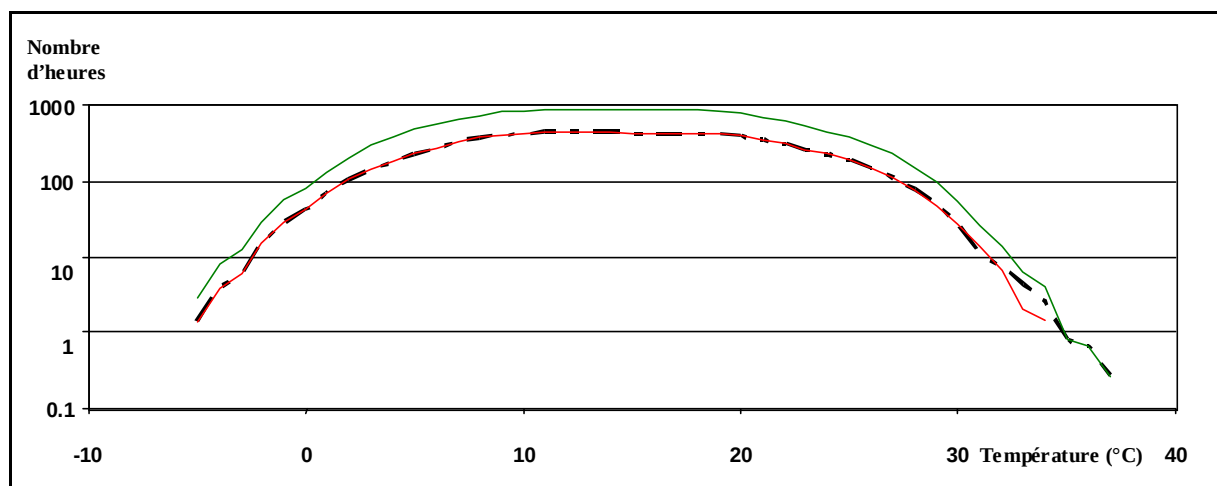


Figure 21: Répartition des heures passées en fonction de la température

La courbe rouge indique la répartition du temps passé à une température pour la ville de Toulon, la courbe noire étant celle de Strasbourg, ces deux courbes étant pratiquement confondues jusqu'à 30°C. La courbe rouge s'en écarte à partir de cette valeur et se termine vers 35°C, c'est à dire que la courbe verte (cumul) s'identifie à la courbe noire (Strasbourg) entre 35 et 38°C.

La courbe verte est donc le cumul des heures correspondant à la température que devra supporter l'équipement lorsqu'il fonctionnera durant 15 ans dans chaque ville.

Pour chaque zone climatique relative à un profil de vie ou si plusieurs zones climatiques interviennent dans un profil de vie, on affecte la distribution des valeurs des agents d'un coefficient égal au temps passé dans la zone concernée, toutes situations confondues.

Exemple pour la température :

Pour chaque température et pour chaque profil de vie, on additionne les durées effectives passées dans chaque zone. On obtient ainsi les courbes de répartition des temps passés à chaque température.

Soit le Profil de vie N° 1, réparti sur deux zones climatiques (France métropolitaine) suivant les ratios ci-dessous:

A3 = 3000 heures

C1 = 2500 heures

Profil de vie N°2 : ce profil de vie est réparti sur deux zones climatiques (France métropolitaine) suivant les ratios ci-dessous:

A3 = 4000 heures

C1 = 6000 heures

La superposition des courbes représentatives des distributions relatives aux deux zones climatiques considérées permet de tracer une distribution enveloppe des températures : répartition du nombre de jours pour lesquels on atteint une température donnée.

Cette superposition donne les valeurs maximales pour les 2 *profils de vie*.

6.1.2 Guides CEI 60721-3 pour le choix des essais d'environnement climatiques

Les normes CEI 60721-3 « Classification des groupements d'agents d'environnements et de leurs sévérités » permettent de définir les niveaux des agents d'environnement auxquels un matériel est susceptible d'être exposé en fonction de l'étape du profil de vie de ce matériel :

- stockage (CEI 60721-3-1),
- transport (CEI 60721-3-2),
- utilisation à poste fixe protégé contre les intempéries (CEI 60721-3-3),
- utilisation à poste fixe non protégé contre les intempéries (CEI 60721-3-4),
- installation des véhicules terrestres (CEI 60721-3-5),
- environnement des navires (CEI 60721-3-6),
- utilisation en déplacement (CEI 60721-3-7),

- microclimats à l'intérieur du produit¹ (CEI 60721-3-9).

Les agents d'environnements traités sont :

- les agents climatiques (principalement température, humidité relative, taux de variation de la température, pression atmosphérique, rayonnement solaire, rayonnement de chaleur, mouvement de l'air environnant, condensation, précipitation entraînée par le vent, eau d'autre origine que la pluie, formation de glace),
- les agents biologiques (flore et faune²),
- les substances chimiquement actives (sels marins ainsi que les gaz polluants acides, basiques et/ou oxydants),
- les substances mécaniquement actives (poussière et sable),
- les conditions mécaniques (vibrations stationnaires sinusoïdales et chocs),
- des conditions associées au feu.

Les sévérités spécifiées pour chaque agent d'environnement sont basées sur des valeurs extrêmes réelles (valeurs dépassées pendant une fraction de temps insignifiante de la durée totale d'exposition ou pendant une fraction insignifiante du nombre total d'évènement) qui peuvent être considérées comme des valeurs maximales. Les normes CEI 60721-3 constituent donc un outil pour la définition des conditions d'environnement auxquelles un matériel est susceptible d'être exposé en fonction de ses modalités de stockage, de transport et d'exploitation.

Le regroupement des agents en catégories (étape du profil de vie, famille d'agents d'environnement concernée, sévérité) et des classifications d'environnements types (combinaison de familles d'agents et de sévérités associés) permettent d'exprimer de manière rapide et synthétique des conditions environnementales données.

Par exemple, la classification d'environnement IE12 correspond à un stockage dans un local n'ayant « ni température ni humidité contrôlée, où le chauffage peut être utilisé pour relever les basses températures, où le type de construction du bâtiment évite des températures extrêmement élevées, avec risque de condensation, de gouttelettes d'eau et de formation de glace ». Cette classification regroupe :

- la catégorie climatique 1K3,
- les catégories climatiques spéciales : 1Z2 et 1Z5,
- la catégorie biologique : 1B1,
- la catégorie de substances chimiquement actives : 1C2,
- la catégorie de substances mécaniquement actives : 1S2,
- la catégorie mécanique : 1M2

¹ Température et humidité relative seulement.

² Pas de valeurs quantitatives.

Chaque catégorie correspond à un agent ou une famille d'agent d'environnement avec indication notamment de niveaux maximum. Par exemple, la catégorie de substances chimiquement actives 1C2 est définie par les agents:

- sels marins (brouillard salin),
- dioxyde de soufre (teneur maximale de 0,37 cm³ de SO₂ par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),
- hydrogène sulfuré (teneur maximale de 0,36 cm³ de H₂S par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),
- chlore (teneur maximale de 0,1 cm³ de Cl₂ par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),
- chlorure d'hydrogène (teneur maximale de 0,33 cm³ de HCl par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),
- fluorure d'hydrogène (teneur maximale de 0,036 cm³ de HF par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),
- ammoniac (teneur maximale de 4,2 cm³ de NH₃ par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),
- ozone (teneur maximale de 0,05 cm³ de O₃ par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),
- oxydes d'azote (teneur maximale de 0,52 cm³ d'équivalent dioxyde d'azote par m³ d'air à 20°C et à une pression de 101,3 kPa),

Des guides CEI 60721-4 « guides pour la corrélation et la transformation des classes de conditions d'environnement de la CEI 60721-3 en essais d'environnement de la CEI 60068 » sont associés à chaque norme CEI 60721-3. Ces guides permettent de sélectionner les essais d'environnement pertinents pour évaluer le comportement à court terme du matériel dans les conditions environnementales qui lui sont associés. Les modalités et sévérités de ces essais d'environnement sont principalement issues des normes CEI 60068-2. Les essais recommandés ne concernent que les catégories climatiques et mécaniques. Pour les autres catégories, les essais appropriés doivent être définis et justifiés sans support normatif CEI. Les guides CEI 60721 précisent que les programmes d'essais préconisés sont, d'une part, applicables à des matériels électrotechniques, d'autre part, dimensionnés pour apprécier l'aptitude d'un matériel « à fonctionner de manière satisfaisante » dans une classe de groupements d'agents d'environnement donnée (leur sévérité ne permet pas de valider la pérennité du matériel). Ce type de démarche a été également mis en œuvre dans le domaine des télécommunications. Les principaux apports sont de disposer d'une méthodologie pour formaliser synthétiquement les conditions environnementales d'un matériel et de définir des sévérités forfaitaires contractuelles d'essais thermiques (chaud, froid et cycles thermiques), de chaleur humide, d'étanchéité et mécaniques pour valider le comportement à court terme de ce matériel en fonction de l'étape du profil de mission prise en compte. En revanche, ces documents ne permettent pas de définir :

- de manière détaillée les contraintes environnementales associées à une situation donnée,
- les modalités d'essais forfaitaires pour valider le comportement à court terme vis-à-vis des contraintes autres que la température, les variations de température, l'humidité et les contraintes mécaniques,
- les modalités forfaitaires pour valider le comportement à long terme vis-à-vis des contraintes climatiques et mécaniques.

6.1.3 Méthode basée sur les configurations fonctionnelles.

Pour être réalisée, la synthèse des environnements climatiques doit prendre en compte les paramètres suivants, déclinés du profil de vie ou d'autres exigences définies par le client :

- le domaine d'emploi,
- la configuration du matériel.

Le domaine d'emploi d'un matériel est généralement décomposé de la manière suivante :

- le domaine normal : il intègre les environnements que le système va rencontrer durant son utilisation courante,
- le domaine limite : il intègre les environnements de même nature que ceux du domaine normal mais d'intensités supérieures ou les agressions spécifiques non présentes dans le domaine normal,
- le domaine extrême : il intègre les environnements particuliers où ceux pour lesquels les niveaux d'agressions dépassent ceux du domaine limite.

Ces domaines ont la particularité d'être reliés à des critères de tenue fonctionnelle du matériel. Ainsi :

- Pour le domaine normal : le matériel doit correctement fonctionner, avec un niveau nominal de performance et de sécurité, avant et/ou après la sollicitation climatique,
- Pour le domaine limite : Il est toléré des dégradations réversibles des performances du matériel durant la sollicitation, toutefois l'état de sécurité du matériel et de la chaîne fonctionnelle dans laquelle il est intégré doit rester nominal. Le matériel doit retrouver un niveau de performance et de sécurité nominal si la sollicitation passe dans le domaine normal ou s'arrête,
- Pour le domaine extrême : Il est toléré des dégradations mécaniques et fonctionnelles irréversibles durant la sollicitation sous réserve que l'état de sécurité du matériel et de la chaîne fonctionnelle dans laquelle il est intégré reste à un niveau nominal. L'état de sécurité du matériel doit rester à un niveau nominal si la sollicitation passe dans le domaine normal limite ou s'arrête.

La configuration du matériel comprend:

- la configuration fonctionnelle du matériel,
- la configuration physique du matériel.

On définit par configurations fonctionnelles, les états fonctionnels du matériel lors de son profil de vie. A titre d'illustration, ces états peuvent être les suivants :

- matériel hors tension,
- matériel sous-tension mais hors fonctionnement (aussi parfois appelé « standby »),
- matériel sous-tension et en fonctionnement.

Nota : d'autres configurations non identifiées ci-dessus pourraient être ajoutées, selon les spécificités fonctionnelles du matériel.

La configuration physique est caractérisée par la manière dont le matériel s'interface mécaniquement et/ou électriquement avec son « environnement extérieur ». A titre d'illustration on pourrait envisager les configurations physiques suivantes :

- matériel en conteneur,
- matériel hors conteneur à poste sur un avion, un navire, un camion...,
- matériel hors conteneur en maintenance mécanique ou électrique dans un local dédié,
- etc...

Ainsi, au sein d'un domaine d'emploi donné, la synthèse des agents climatiques consiste à restituer, pour chaque couple de configuration fonctionnelle et physique, non seulement les contraintes d'environnement climatique maximales décrites pour chacune des situations de vie du thème d'emploi, mais aussi, et lorsque cela est nécessaire, le cumul dans le temps des contraintes environnementales que le matériel va subir tout au long de son cycle de vie. La notion de cumul dans le temps (ou fatigue) s'appréhende assez bien pour certains agents climatiques, tels que par exemple les cycles de températures et ses effets thermomécaniques qui génèrent sur les matériels des contraintes dont les effets peuvent être plus ou moins pénalisants selon l'amplitude des cycles et la durée d'exposition à ces cycles. Pour d'autres agents, la notion de cumul est plus difficilement appréhendable car elle dépend plus des spécificités du matériel en regard des sollicitations environnementales. Cela est le cas par exemple de la neige ou la glace qui n'ont a priori pas d'effets directs sur la fatigue du matériel et donc peuvent être appréhendés en valeur maximale pour dimensionner. Il n'en reste pas moins vrai et important que l'effet de cumul dans le temps des contraintes climatiques doit toujours être observé en regard du type d'agent traité et de la conception et exigence de tenue du matériel.

Le tableau 11 fait une proposition d'identification (donnée à titre d'illustration) :

- des agents climatiques qui sont susceptibles d'être synthétisés directement en valeur maximale,
- des agents climatiques, dont la synthèse doit non seulement couvrir les valeurs maximales mais aussi être représentative du cumul des contraintes générées dans le temps.

		Synthèse en Valeur Maximale	Prise en compte nécessaire du cumul dans le temps de la contrainte générée par l'agent climatique
		Ce tableau est donné pour illustration, chaque matériel pouvant présenter une spécificité en regard des contraintes climatiques.	
Chaud	Oui	Oui	<i>pour le vieillissement des matières pyrotechniques ou la fatigue thermomécanique générée par les cycles thermiques</i>
Froid	Oui	Oui	<i>pour la fatigue thermomécanique générée par les cycles thermiques</i>

Cycles de température	Oui	Oui <i>pour le vieillissement des matières pyrotechniques ou la fatigue thermomécanique générée par les cycles thermiques</i>
Chaleur humide	Oui	Oui <i>une exposition à long terme aura des effets plus importants qu'une exposition courte, mais les durées d'essais à prendre en compte selon la durée d'exposition est souvent forfaitaire, dictée par les normes ou reprise de spécifications de systèmes comparable</i>
Givre-Gel-Dégel	Oui	A priori Non <i>dépend de la conception du matériel. En général une épreuve forfaitaire issue des normes est utilisée avec une procédure d'essai et donc une durée spécifiée</i>
Rayonnement solaire (effet actinique)	Oui	Oui <i>une exposition prolongée peut avoir des effets actiniques important notamment sur les peintures</i>
Brouillard Salin	Oui	Oui <i>une exposition à long terme aura des effets corrosifs certes plus importants qu'une exposition courte, mais les durées d'essais à prendre en compte selon la durée d'exposition est souvent forfaitaire et dictée par les normes ou reprise de spécifications de systèmes comparable</i>
Pression	Oui	Oui <i>une exposition à long terme peut avoir une influence sur le taux de fuite d'un matériel notamment s'il est pressurisé, ou même générer des contraintes mécaniques s'il est soumis à de nombreux cycles de variations de pressions</i>
Pluie	Oui	A priori Non (sauf effets érosifs) <i>dépend de la conception du matériel. En général une épreuve forfaitaire issue des normes est utilisée avec une procédure d'essai et donc une durée spécifiée</i>
Neige	Oui	A priori Non <i>ces essais étant plutôt spécifiés pour vérifier l'aptitude du matériel à résister au chargement généré par l'accumulation de neige, et selon le cahier des charges, à vérifier qu'il puisse correctement fonctionner lorsqu'il est recouvert de neige</i>
Glace	Oui	A priori Non <i>comparable à la neige</i>
Vent	Oui	A priori Non <i>sauf : effets érosifs mais plutôt traité par les essais de sable et poussière, et</i>

		<i>répétition de séquence de vents régulier ou en rafale qui aurait tendance à solliciter cycliquement des parties spécifiques du matériel et donc à générer des cycles de contraintes répétées</i>
Sable et poussière	Oui	<i>Une exposition à long terme aura des effets certes plus importants qu'une exposition de courte durée, mais les durées d'essais à prendre en compte selon la durée d'exposition est souvent forfaitaire et dictée par les normes ou reprise de spécifications de systèmes comparable</i>
Fluides contaminants	Epreuve technologique (pas d'effets dans le temps a priori, l'idée étant plutôt de caractériser la compatibilité des matériaux avec les fluides spécifiés)	
Moisissures	Epreuve technologique (pas d'effets dans le temps a priori, l'idée étant plutôt de caractériser la compatibilité des matériaux avec les souches spécifiées)	

Tableau 11 : Proposition d'identification

Il faut enfin rappeler qu'il est nécessaire, lors du processus de qualification, de respecter un enchaînement des essais climatiques représentatif du profil de vie du matériel. Cependant, certains essais dits technologiques, dont l'objectif est de révéler les faiblesses de conception sans réelle corrélation avec les contraintes effectivement rencontrées au cours de la vie réelle ou spécifiée du matériel, peuvent faire l'objet de traitements spécifiques (réalisés à la fin des essais de qualification ; réalisés sur un spécimen dédié, etc...). Par ailleurs, lors des essais de qualification, on s'attachera non seulement à valider la tenue aux valeurs maximales des contraintes d'environnement climatiques spécifiées mais aussi, lorsque cela le nécessite, à bien valider le cumul des contraintes dans le temps pour prendre en compte la fatigue thermomécanique par exemple.

Le synoptique (figure 22) illustre, le processus de synthèse prenant en compte :

- les situations du profil de vie,
- les agents climatiques susceptibles d'être rencontrés au cours de cycle de vie,
- les configurations physiques susceptibles d'être rencontrées par le matériel au cours du cycle de vie,
- les configurations fonctionnelles susceptibles d'être rencontrées par le matériel au cours du cycle de vie

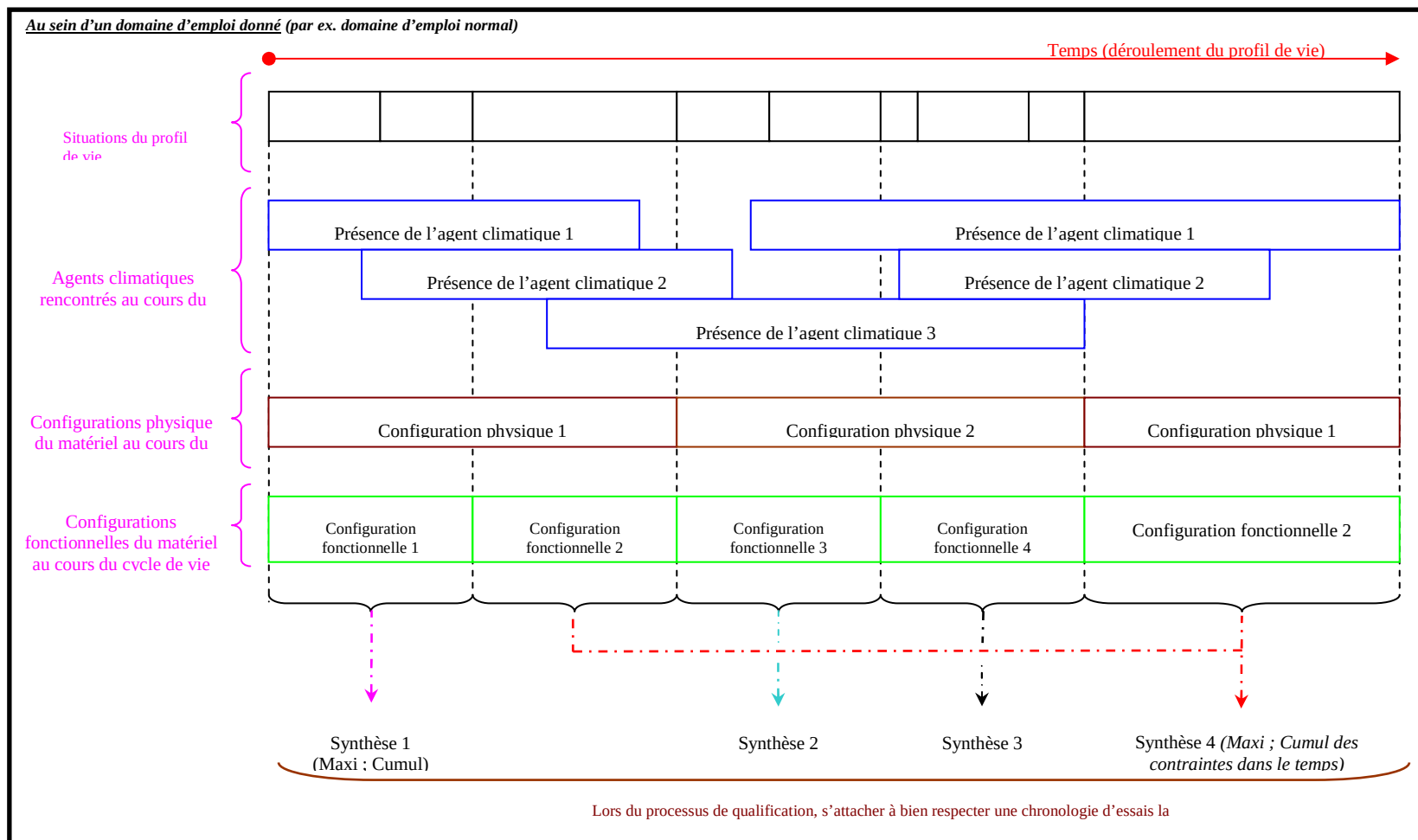


Figure 22 : Processus de synthèse

6.1.4 Les climatogrammes

L'exploitation des climatogrammes consiste à comparer et apprécier les conditions de température et d'humidité susceptibles d'être rencontrées par un matériel au cours de son profil de vie.

6.1.4.1 Définition

Le climatogramme représente l'aire couverte sur le graphe par toutes les valeurs du couple température/humidité dans une zone climatique définie ou spécifiée pour un essai de chaleur humide.

6.1.4.2 Exemple

Le climatogramme N°1 (figure 23) représente toutes les valeurs des couples température/humidité relative que l'on peut rencontrer en France Métropolitaine suivant les données GAM EG 13. Les valeurs extrêmes sont prises en compte.

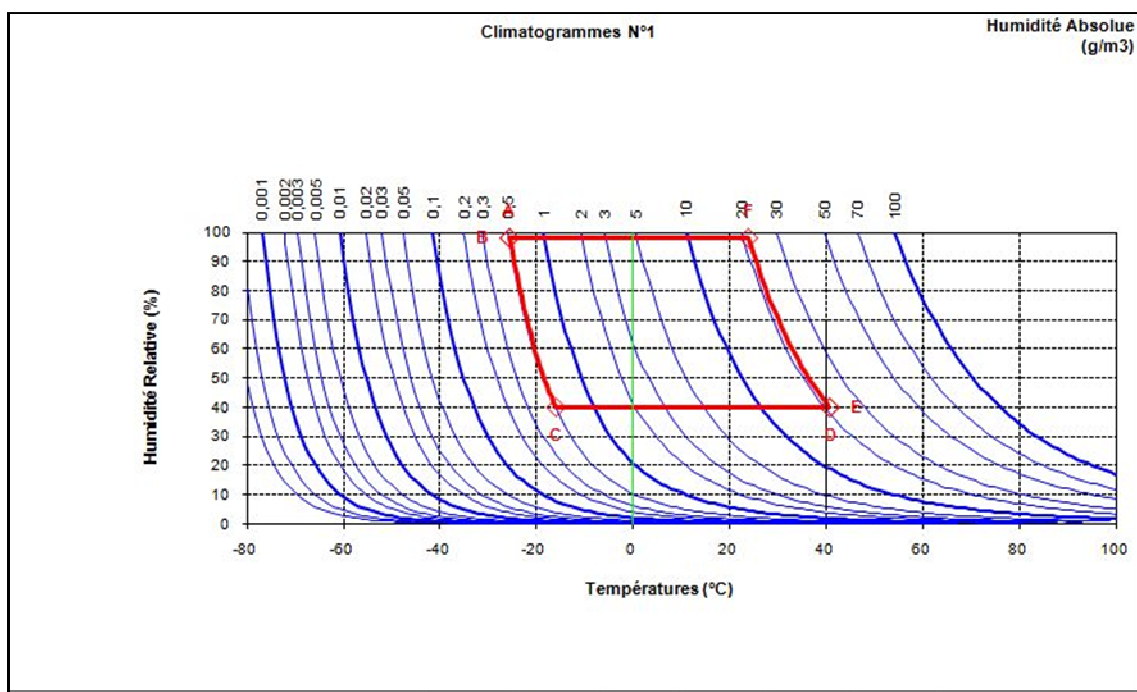


Figure 23 : Climatogramme N°1 représentant en rouge la totalité des couples température/humidité en métropole

L'exploitation de ce climatogramme indique que pour qu'un matériel soit compatible avec cette zone climatique, il faut qu'il soit en état de remplir sa fonction pour des valeurs de température/humidité relative comprises dans les limites présentées dans le tableau 12.

Température (°C)	Humidité relative (%)	Humidité Absolue g/m ³
- 25,6	98	0,66
- 16	40,8	0,61
24	95	20,69
+40,8	40,8	20,86

Tableau 12 : Valeurs limites des couples température/humidité relative à la France métropolitaine

6.1.4.3 Utilisation des climatogrammes

Lors du choix des valeurs climatiques naturelles représentant le couple température/humidité relative d'une zone météorologique, il faut bien prendre en compte les effets attendus sur le matériel. Les banques de données présentent la plupart du temps les conditions climatiques de manière suivante :

- valeurs extrêmes,
- moyennes journalières.

Pour évaluer l'influence de ces données, le climatogramme apporte une aide précieuse.

En conservant toujours la zone France métropolitaine sur le climatogramme les valeurs extrêmes et moyennes journalières sont représentées par les deux séries de données (climatogramme 2 et tableau 13).

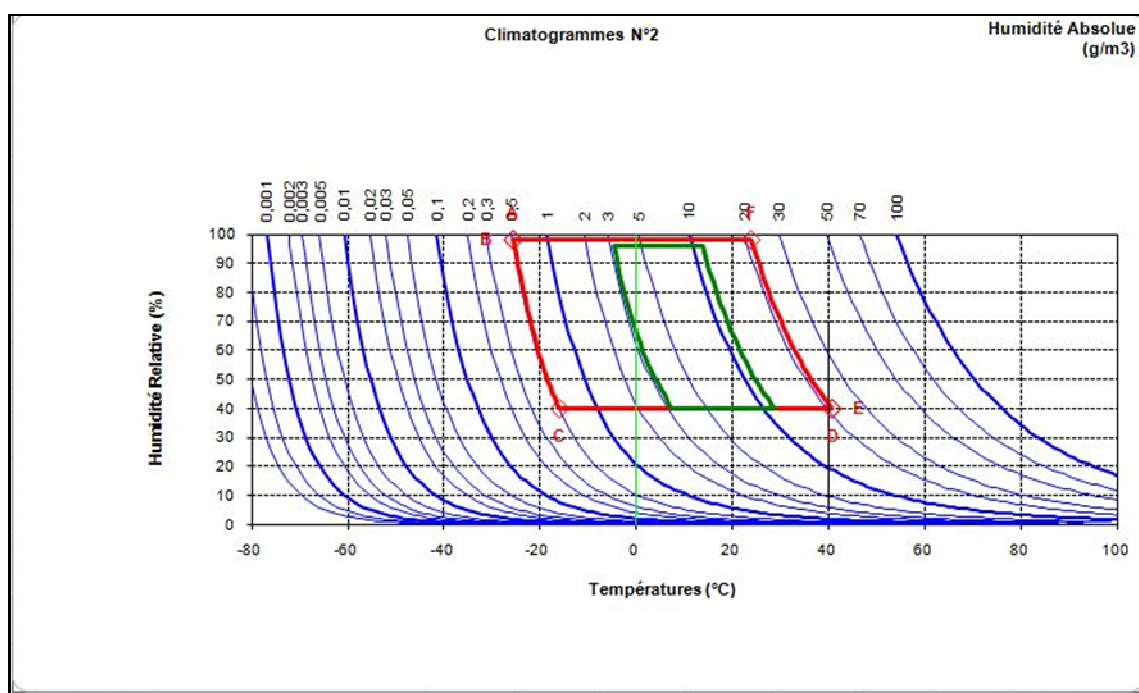


Figure 24 : Climatogramme N°2 représentant en rouge les valeurs extrêmes et en vert les moyennes journalières.

Température (°C)	Humidité relative (%)	Humidité Absolue g/m ³
-4,7	96	3,35
28,8	40	11,38

Tableau 13 : Valeurs journalières France métropolitaine

Nota : On ne donne que deux couples de valeurs au lieu de quatre, comme dans le tableau 12, les deux autres couples s'estimant par l'utilisation du réseau du climatogramme.

6.1.4.4 Essais « valeurs refuges »

Pour vérifier la fonction d'un matériel pendant l'application de la contrainte chaleur humide, il est très souvent fait appel aux valeurs refuges³ figurant dans les normes d'essais.

La question que le spécificateur doit se poser est de savoir si cet essai correspond au besoin.

Les climatogrammes peuvent apporter des éléments de réponse à cette question comme le montre l'exemple suivant :

Température (°C)	Humidité relative (%)	Humidité Absolue g/m ³
+20	93	16,9
+40	85	47,5

Tableau 14 : Exemple de valeurs refuges

Le climatogramme N°3 montre bien les différences existantes entre les domaines climatiques extrêmes (courbe enveloppe rouge), moyenne journalières (courbe enveloppe vert) et celle de l'essai proposé (courbe enveloppe bleue).

³ La difficulté pour définir les valeurs à prendre en compte lors d'un essai, explique le choix des valeurs refuges.

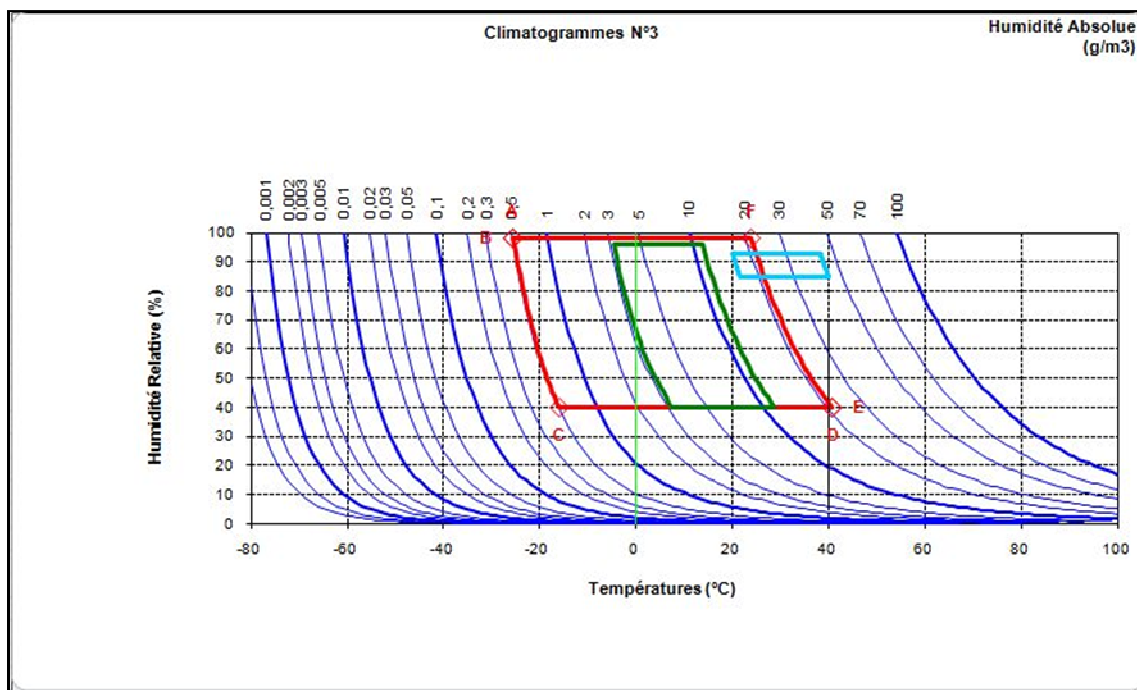


Figure 25 : Climatogramme N°3 représentant en bleu une sévérité d'essai avec valeurs refuges.

La connaissance approfondie du matériel et des caractéristiques à vérifier peuvent seules valider ou non cet essai.

6.1.4.5 Exemples d'utilisation

- Positionnement d'un essai spécifique d'un produit par rapport à sa zone d'emploi

Soit un matériel qui à basse température possède des caractéristiques macroscopiques de type cellules fermées. Ce matériel est plus ou moins étanche à la pénétration de vapeur d'eau.

Pour ce matériel la contrainte significative est la température. Plus celle ci s'élève, plus le matériel est perméable à la vapeur d'eau.

Soumettons ce matériel à un essai dont le couple température/humidité relative, correspond à une humidité absolue constante de 47,5 g d'eau par m³ d'air humide. Essai refuge du tableau 3.

Si le matériel se révèle déficient, s'agit-il d'un critère de non-qualité ou d'un défaut de sur-qualité ?

Si ce matériel est utilisé en France métropolitaine *courbes enveloppes rouge et verte*, le matériel ne sera jamais soumis à *plus de 21 grammes d'eau par m³ d'air humide*.

Les valeurs refuges données par les normes d'essai (courbe enveloppe bleue *climatogramme N°3*) peuvent ne pas concerner ce type de matériel, il faut donc définir un essai qui correspond à ce matériel et vérifie son adéquation avec sa zone géographique d'emploi

Par exemple, les valeurs de test du tableau 15 représentées sur le *climatogramme N°4* ci-dessous, sont en adéquation avec les limites d'un produit (courbe enveloppe orange).

L'interrogation est: Ce produit peut-il être déployé en France métropolitaine ?

Température (C)	Humidité relative (%)	Humidité Absolue g/m ³
0	95	4,61
+20	65	11,25

Tableau 15 : tableau de valeurs d'essais climatiques d'un produit spécifique.

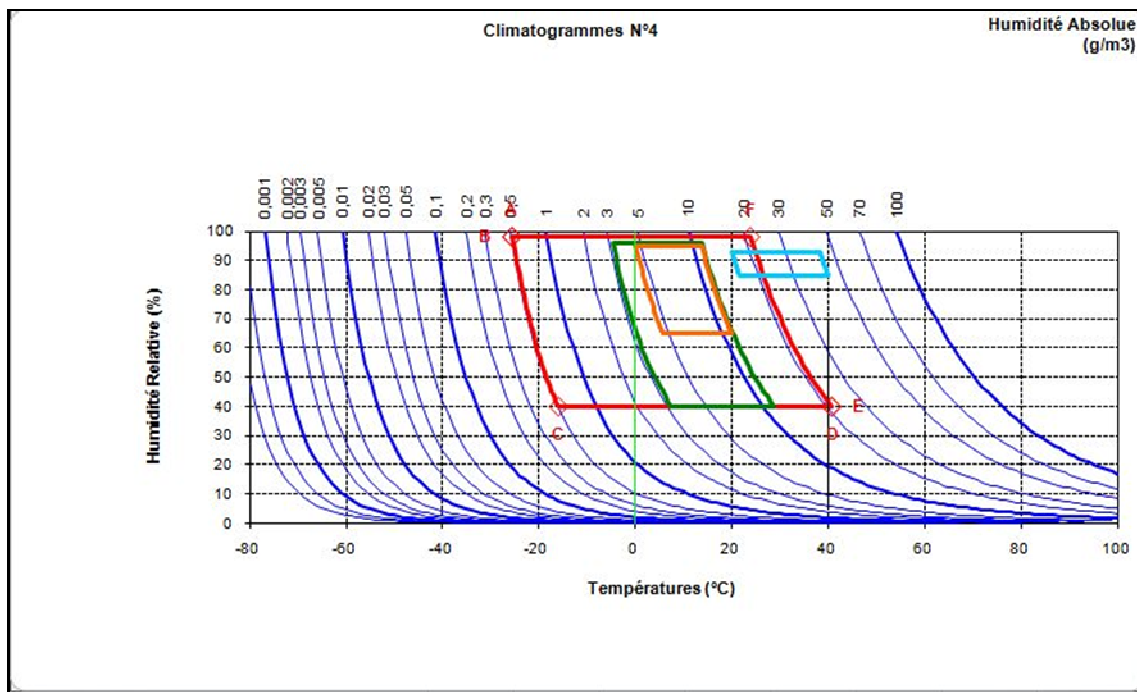


Figure 26 : Climatogramme N°4 représentant un essai d'un produit spécifique

L'aire représentée par cet essai (enveloppe orange) couvre la zone maxi des couples température/humidité de la France métropolitaine obtenue par les moyennes journalières (enveloppe verte), mais ne couvre pas les maxi des couples température/humidité des valeurs extrêmes (courbe enveloppe rouge); ainsi les limites du domaine d'emploi normal de ce produit peuvent être établies.

- Définition d'un essai personnalisé à la zone d'emploi

Grâce aux climatogrammes, un essai personnalisé peut être défini en relation avec sa zone d'emploi (voir climatogramme N° 5).

A partir du climatogramme N°2, un essai est défini pour les couples maxi de la zone rouge. Cette aire a pour bornes;

Température (C)	Humidité relative (%)	Humidité Absolue g/m ³
20	98	16,95
40	40	20,45

Tableau 16 : tableau de valeurs d'essais climatiques d'un produit spécifique.

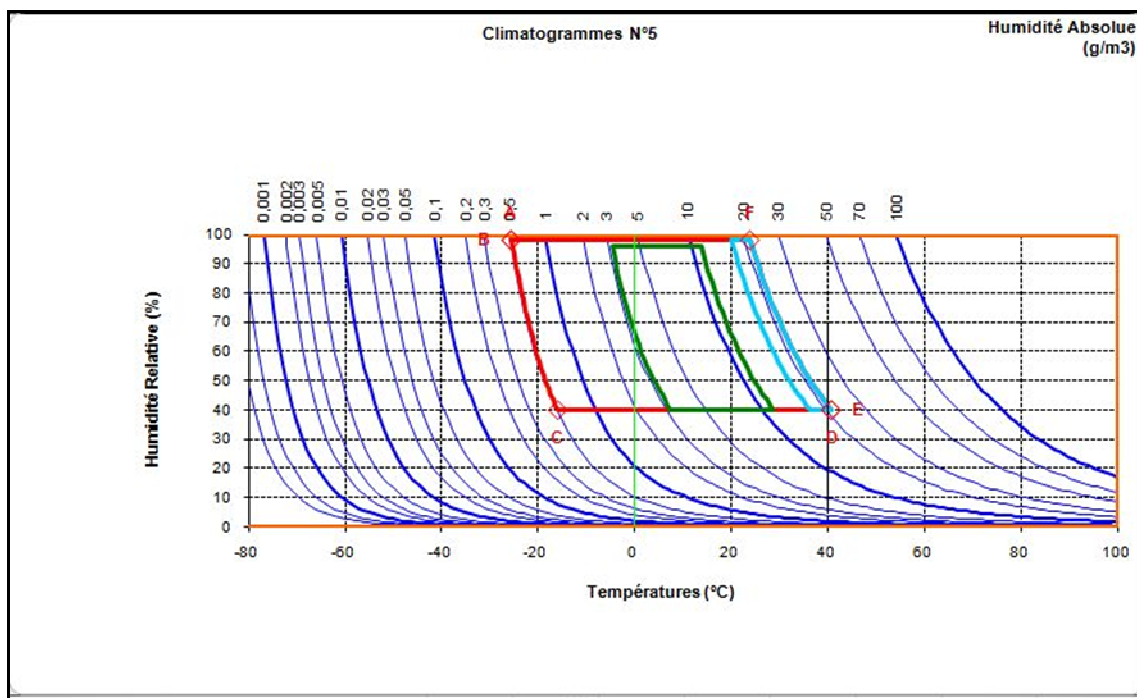


Figure 27 : Climatogramme N°5 représentant l'aire de l'essai personnalisé (courbe enveloppe bleue) vis-à-vis de ceux de la France métropolitaine.

On peut considérer que cet essai correspond au besoin, puisque dans notre exemple le produit est confronté aux hautes températures.

6.1.4.6 Règle d'utilisation des climatogrammes

Les climatogrammes sont des représentations de phénomènes naturels lents dont le but est notamment de favoriser les conditions de condensation, absorption ou adsorption d'humidité. Pour ces raisons, les règles de mise en œuvre de tels essais imposent fréquemment des vitesses de variation inférieures à 10% de HR par heure, pour l'humidité et +0,5°C par minute, pour la température.

Les conditions d'évolution de l'humidité imposent également de s'assurer de la puissance des moyens d'essais (génération d'humidité) lorsque l'on augmente la température de façon importante.

6.1.4.7 Conclusion

L'utilisation des climatogrammes permet de comparer des zones climatiques, des essais, mais aussi de définir des valeurs d'essai en prenant en compte l'aire du besoin adapté aux caractéristiques du matériel.

L'essai de chaleur humide, à partir de valeurs refuges issues des normes sectorielles, sans connaissance de ses effets possibles sur le matériel, n'est pas toujours adapté au besoin.

Dans la mesure où il existe des documents issus de l'expérience, permettant de réaliser des essais spécifiques sur certains types de matériaux, il est préférable de les utiliser plutôt que de se référer aux documents normatifs traitant plus généralement d'une catégorie de matériaux.

7. RECOMMANDATIONS SUR LE CHOIX DES VALEURS DES PARAMETRES

7.1 Coefficient d'exagération

7.1.1 Pour la loi d'Arrhenius

Concernant la loi d'Arrhenius, on trouve peu de recommandations explicites sur les valeurs des coefficients d'exagération. En tous cas, ce type de recommandation est toujours intimement associé à un domaine d'utilisation, à un produit ou même à un couple « domaine d'utilisation/produit ». Par exemple, il est indiqué :

- Organes électroniques automobiles [B 21 7130] : le coefficient d'exagération doit rester inférieur à 20 pour rester représentatif des phénomènes réels,
- Composants électroniques [GOU-01]: pour les coefficients d'exagération d'essais de chaleur sèche (la valeur maximale de température de vieillissement est généralement toujours être inférieure à la température de transition vitreuse de la résine d'encapsulation), on peut appliquer la procédure suivante pour définir une énergie d'activation :
 - en l'absence d'informations sur le mécanisme de défaillance prépondérant, on retient une valeur de 0,5 eV,
 - au cours des discussions clients/fournisseurs sur les résultats de ces essais, on retient généralement :
 - la valeur obtenue par les essais en présence de défauts identifiés,
 - 0,3 eV en présence de défauts non identifiés sans équivoque,
 - 0,7 eV en l'absence de défauts.
- Systèmes d'isolation de produits électrotechniques [NF EN 60505] : Pour la majorité des systèmes d'isolation, la durée de vie est divisée par deux pour une augmentation de température comprise entre 8 K et 15 K

D'autres valeurs plus spécifiques sont reprises dans le tableau 1 au paragraphe 2.5. Quoi qu'il en soit, il convient de s'assurer de la prise en compte des précautions énoncées au paragraphe 2.1 lors de l'application de la loi d'Arrhenius.

7.1.2 Pour les SRE et SDF

Cf. paragraphe 3.8.5.

7.2 Valeurs des paramètres des modèles des SRE et SDF

7.2.1 Choix de la valeur b

Valeurs usuelles

Dans les normes, ce paramètre est souvent fixé a priori à une certaine valeur, avec les conséquences possibles d'un sur-test (*cas des structures en aluminium ou en acier quand b est fixé à 5*) ou d'un sous-test (*cas de l'électronique quand b est choisi égal à 8*). On pourrait par exemple dans le cas d'un équipement électronique valider séparément le boîtier ($b=8$) et les cartes électroniques ($b=4$).

La valeur actuellement préconisée pour b dans l'Annexe Générale Mécanique de la **GAM EG 13** est :

- alliages d'aluminium : 6 à 10,
- aciers: 10 à 15,
- alliages de magnésium : 20 à 25.

Dans un matériel complexe, de nombreux types d'endommagement sont possibles autres que le dommage par fatigue. Pour l'électronique, lorsque la rupture est due à une fatigue de type mécanique (par exemple soudures), la courbe de Wöhler s'applique avec un *paramètre b de l'ordre de 3 à 4*. Mais la dégradation par corrosion et fretting des contacts peut être importante. Les équivalences basées sur des défauts de fonctionnement manquent encore de données cohérentes.

La norme **MIL STD 810** préconise une valeur a priori de 7,5 alors que la **DEF STAN 0035** propose une valeur de 5.

Une valeur de 3 à 4 est aussi le cas des roulements à billes et des soudures. Des travaux récents conduisent à des valeurs comprises *entre 4 et 6* pour des soudures de composants électroniques *CMS ou BGA*.

Dans la littérature on trouve des valeurs de b rappelées dans les *tableaux 17 et 18*.

Matériau	b
Fil de cuivre	9,28
Alliage d'aluminium 6061-T6	8,92
7075-T6	9,65
Soudure tendre (63-37 Etain-Plomb)	9,85
4340 (BHN 243)	
4340 (BHN 350)	10,5
AZ31B Alliage de magnésium	13,2
	22,4

Tableau 17: Quelques valeurs de b [LAM80]

<i>Matériau</i>	<i>Type d'essai de fatigue</i>	$\frac{s_{min}}{s_{max}}$	<i>b</i>
Aluminium 2024-T3	Charge axiale	-1	5,6
Aluminium 2024-T4	Poutre en rotation	-1	6,4
Aluminium 7075-T6	Charge axiale	-1	5,5
Aluminium 6061-T6	Poutre en rotation	-1	7,0
Magnésium ZK-60			4,8
Magnésium BK31XA-T6	Charge axiale	0,25	8,5
	Poutre en rotation	-1	5,8
Magnésium QE 22-T6	Wöhler	-1	3,1
Acier 4130			
Normalisé	Charge axiale	-1	4,5
Durci	Charge axiale	-1	4,1
6Al-4V Ti	Charge axiale	-1	4,9
Beryllium			
Pressé à chaud	Charge axiale	0	10,8
Bloc		0,2	8,7
Feuille roulée croisée	Charge axiale	-1	12,6
		0,2	9,4
Invar	Charge axiale		4,6
Cuivre recuit			11,2
Fibre de verre 1S1			6,7

Tableau 18 : Quelques valeurs de *b* [DEI72]

Il faut noter que la valeur du paramètre *b* varie en fonction de la température. Il convient donc de s'assurer que la valeur retenue pour les calculs a été déterminée dans des conditions représentatives.

Valeur préconisée :

Il est proposé de considérer qu'en début de programme (phase de faisabilité/définition), l'approche doit être conservative et une valeur $b = 5$ est à considérer (s'il est envisagé de réduire la durée des essais). Cette valeur sera reconsidérée si besoin est, fonction de l'expérience initiale ou acquise au cours des essais réalisés.

Dans la phase de définition/développement du matériel, une approche calcul permettra d'appréhender les points faibles dont les courbes de Wöhler seront caractérisées à partir d'essai de fatigue.

Les Justifications de $b = 5$ sont principalement:

- premièrement, des essais récents sur technologie **CMS et BGA** qui ont conduit à des valeurs de b entre 4 et 6. Ces résultats rejoignent les travaux du **CEA [DR2]**,
- deuxièmement, la présence d'une non-linéarité en raideur, qui conduit par rapport au cas linéaire équivalent à diminuer la valeur de b . Le choix d'une valeur faible pour b intègre donc de façon conservatrice l'éventualité d'un comportement non-linéaire.

Ces essais ont par ailleurs montré que la courbe SN tracée à partir de l'observation d'une panne électrique de la carte a la même pente que celle de la courbe classique correspondant à une rupture physique (*même paramètre b*).

7.2.2 Choix des valeurs K et C

Dans la formule du dommage par fatigue vue dans le *paragraphe 3*,

$$D = \frac{K^b}{C} \sum_i n_i \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_i^b$$

les coefficients K (proportionnalité entre gradient thermique et contrainte) et C (ordonnée à l'origine de la partie linéaire de la courbe de Wöhler) sont en général fixés à 1.

Ce choix est sans conséquence dans la mesure où ces coefficients restent identiques tout au long du processus et se compensent lors de l'utilisation des formules réciproques (*retour à un profil thermique à partir du SDF*).

L'expression du SDF est donc connue à un facteur multiplicatif près et adaptée à une approche comparative.

Figures

Figure 1 : Courbe de Whöler	12
Figure 2: Système mécanique à 1 ddl	27
Figure 3 : Mur semi-infini.....	29
Figure 4 : Profil de température	Figure 5 : Température dans le mur
	29
Figure 6 : Schéma de synthèse pour chaque événement.....	36
Figure 7 : Exemple de synthèse des événements	37
Figure 8 : Situations en série	Figure 9 : Traitement des situations en parallèle
	38
Figure 10 : Processus de validation de la spécification	39
Figure 11 : Modes opératoires « Variations de température » de la norme GAM EG13	40
Figure 12 : Spectres de réponse extrême	41
Figure 13 : Spectres de dommage par fatigue.....	41
Figure 14 : Réduction de la durée	41
Figure 15 : Réduction de la durée	41
Figure 16 : Environnement réel « Incendie ».....	42
Figure 17 : Spectre de réponse extrême.....	42
Figure 18 : Comparaison Spécification / Environnement réel.....	42
Figure 19: Exemple de profil de vie	59
Figure 20: Nombre d'heures cumulées	60
Figure 21: Répartition des heures passées en fonction de la température	60
Figure 22 : Processus de synthèse.....	68
Figure 23 : Climatogramme N°1 représentant en rouge la totalité des couples température/humidité en métropole.....	69
Figure 24 : Climatogramme N°2 représentant en rouge les valeurs extrêmes et en vert les moyennes journalières.....	70
Figure 25 : Climatogramme N°3 représentant en bleu une sévérité d'essai avec valeurs refuges. ..	72
Figure 26 : Climatogramme N°4 représentant un essai d'un produit spécifique	73

Figure 27 : Climatogramme N°5 représentant l'aire de l'essai personnalisé (courbe enveloppe bleue)
vis-à-vis de ceux de la France métropolitaine..... 74

Tableaux

Tableau 1: Ordres de grandeurs de paramètres associés à des modèles de vieillissement.....	16
Tableau 2: Exemples de durées de vie en fonction de la température.....	23
Tableau 3 : Valeurs de k en fonction de l'ordre de la réaction.....	33
Tableau 4: Valeurs du pourcentage de molécules restant en fonction de l'ordre de la réaction	34
Tableau 5 : Expressions du coefficient de garantie	48
Tableau 6: Valeurs de β_n pour des probabilités de défaillance usuelles	49
Tableau 7: CV associés aux valeurs maximales (TMA)	55
Tableau 8 : CV associés aux valeurs minimales (TNA)	55
Tableau 9: Exemples de CVe et CVr.....	56
Tableau 10: Exemples de calculs du coefficient de garantie, du facteur d'essai et de la sévérité d'essai.....	57
Tableau 11 : Proposition d'identification	67
Tableau 12 : Valeurs limites des couples température/humidité relative à la France métropolitaine	70
Tableau 13 : Valeurs journalières France métropolitaine.....	71
Tableau 14 : Exemple de valeurs refuges	71
Tableau 15 : tableau de valeurs d'essais climatiques d'un produit spécifique.....	73
Tableau 16 : tableau de valeurs d'essais climatiques d'un produit spécifique.....	73
Tableau 17: Quelques valeurs de b [LAM80]	76
Tableau 18 : Quelques valeurs de b [DEI72].....	77

Bibliographie

- [ARR-01] S. A. Arrhenius, « Über die Reaktion-geschwindigkeit bei der inversion von rhorzucker durch sauren », Z. Physik. Chem., 4, 226, 1889
- [VAN-01] J. H. Van't Hoff, « Études de dynamique chimique », 1884
- [GLA-01] S. Glasstone, K. J. Laidler, H. E. Eyring, *"The theory of rate processes"*, Mc-Graw Hill, New York, 1941
- [BER-01] M. Berthelot, Ann. de Chim. et de Phys., 110, 1862
- [MAR-01] T. Marot, J. Moriceau, *"Distribution statistique des températures météorologiques"*, Document LRBA 1999
- [FIS-01] R.A. Fischer, L.H.C. Tippett, *"Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest number of a sample"*, Cambridge Philos. Soc., Volume 24, Part 2, 180-190, 1928
- [GUM-01] E. J. Gumbel, *"Statistics of extremes"*, Columbia University Press, New York, 1958
- [PIE-01] L. Pierrat, *"Interaction probabiliste résistance - contrainte entre une loi lognormale et une loi des valeurs maximales"*, Unpublished Internal Report, LJ-Consulting, 2010
- [PIE-02] L. Pierrat, voir article Astelab 2010 (Berthelot/Arrhenius)
- [LAW-01] R. W. Lawson, *"A review of the status of plastic encapsulated semiconductor component reliability"*, Br. Telecom Tech. J., 2, 95-111, 1982
- [GUA-01] D. Y. Guan, T. F. Gukelberger, E. C. Cahoon, T. W. Joseph, J. W. Snowdon, *"New failure mechanisms in temperature and humidity stress"*, Proceedings, 36th Annual Electronic Component Conference, 1986
- [BLA-01] D. J. R. Black, *"Mass transport of aluminium by momentum exchange with conducting electrons"*, Pro. Annual Reliability Physic Symposium, 148-159, 1967
- [COF-01] L. F. Coffin, *Transactions ASME, TASMA*, 76, 931, 1954
- [MAN-01] S. S. Manson, *"Behavior of materials under conditions of thermal stress"*, NACA Technical note 2933, 1954
- [LAU-01] J. H. LAU, *"Thermal fatigue life prediction of flip-chip solder joints by fracture mechanics method"*, Engineering Fracture Mechanics, 45, 5, 643-654, 1993
- [FLY-01] Joseph H. Flynn, « The "Temperature Integral" - Its use and abuse », *Thermochimica Acta*, 300, 83-92, 1997
- [LEH-01] M. Le Huy and G. Evrard, « Methodologies for lifetime predictions of rubber using Arrhenius and WLF models », *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 4624, 135-142, 1998

- [AUD-01] V. Audigier, « Etude du comportement en fatigue des joints brasés de composants électroniques montés en surface », Thèse de l'Ecole Supérieure de l'Energie et de Matériaux de Bordeaux, 1996
- [ERI-01] A. ERIKSSON, A.C. ALBERTSSON P. BOYDELL, J.A.E. Manson, Durability of in-plant recycled glass fiber reinforced polyamide 66, Polymer engineering and science, 1998 , vol. 38, n° 2 , pp. 348 - 356
- [B 21 7130] Norme PSA, «specifications d'environnement des équipements électriques et électroniques - caractéristiques climatiques et chimiques », indice A, 2004
- [LRBA-01] DGA/LRBA « STANAG 4570-AECTP 600 Vieillessement et Extension de Durée de Vie », 16 septembre 2009, 46 pages
- [PIE-03] L. Pierrat, « Moyenne de la durée de vie d'un processus thermodynamique d'Arrhenius lorsque la température est distribuée statistiquement entre deux bornes », Unpublished Internal Report, LJ-Consulting, 2010
- [GMW-01] GMW3172, « General Specification Electrical/Electronic », décembre 2005, 95 pages.
- [AECTP 600-01] AECTP 600, Edition 2, Annexe D, feuillet 602, 19 pages.
- [PEC-01] S. D. Peck, "Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation", Proc. of the Int. Reliab. Phys. Symp., 44-50, 1986.
- [PEC-02] S. D. Peck, Hallberg , 1991.
- [ALQ-01] O. Alquier, S. Berthelot, S. Jebnoun, H. Tolosa, « Comparaison de la sévérité relative d'essais d'environnement climatique », ASTELAB, 2009.
- [TI-01] H. Tolosa, « Tropicalisation du matériel », Techniques de l'Ingénieur, R780, 2001.
- [KOH-01] M. Kohan, Nylon plastics handbook, 1995, Carl Hanser Verlag.
- [NOH-01] M. Nohara, « Study of prediction method for thermo-oxidative life of plastics by thermal analysis », Society of Automotive Engineers of Japan, 1998.
- [ERI-01] P.A. Eriksson, A.C. Albertsson, P. Boydell, J.A.E. Manson, « Durability of in-plant recycled glass fiber reinforced polyamide 66 », Polymer engineering and science, 1998 , vol. 38 , n° 2 , pp. 348 - 356.
- [GIG-01] C. Gigoux, « Essais de fiabilité des composants électroniques : limites de la loi d'Arrhenius », ESSAIS INDUSTRIELS, septembre/octobre 1999, p. 22-25
- [NF EN 60544-4] Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials - Part 2: Procedures for irradiation and test, 1991??
- [LEV-01] S. Le Vilain, « Arrhenius et durée de vie », Note interne DGA.
- [IEC 60216] Matériaux isolants électriques - Propriétés d'endurance thermique - parties 1 (2001), 3 (2002), 5 (2003) et 6 (2003).

- [FID-09] Guide FIDES, "*Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques*", DGA, version 2009.
- [NF EN 60505] Évolution et qualification des systèmes d'isolation électrique, 2000.
- [GOU-01] J.-C. GOURDON, « La fiabilité des composants électroniques », ASTELAB, 1991.