

Cyclage en température des profils complexes FIDES

Temperature cycling of complex profiles FIDES

Rémy Fardella, Claudine Barluet, Charles Grenouilloux

Société : Sagem Défense et Sécurité (site de Massy)

Adresse : 100, avenue de Paris 91344 Massy Cedex - France

Téléphone : +33(0)1 58 11 91 93, e-mail : remy.fardella@sagem.com

Résumé

De plus en plus d'industriels se tournent vers des modèles de fiabilité récents comme FIDES. Ces modèles permettent de saisir de manière réaliste les profils de vie et introduisent un nouveau facteur prépondérant dans la prédiction de la fiabilité qui est la notion de cyclage en température. Les anciens modèles de fiabilité (tel que la MIL-HDBK-217F) ne permettaient pas de modéliser l'accélération apportée par les variations thermiques sur le mécanisme de fatigue thermomécanique.

Le codage du profil de vie est une étape cruciale dans l'élaboration de la fiabilité des systèmes électroniques. La méthode proposée par Sagem DS permet de saisir efficacement les profils de vie, en particulier pour les phénomènes de cyclage en température, et d'appréhender les cas dits « complexes ».

Lors de la présentation au $\lambda\mu$, Sagem DS exposera différents cas « complexes » de profils en majorité aéronautiques et certains militaires afin d'illustrer la mise en application de la méthode proposée.

Summary

More and more industries are interested in recent reliability handbooks as FIDES. These models allow to capture realistically life profiles and introduce a new important factor for reliability prediction which is the temperature cycling. Former reliability models (such as MIL-HDBK-217F) do not allow to model the acceleration provided by thermal variations on thermo-mechanical fatigue mechanism.

Life profile coding phase is a crucial step for electronic design reliability assessment. The method proposed by Sagem DS allow to effectively capture life profiles, especially for temperature cycling phenomenal, and allow to deal with "complex" cases.

During the $\lambda\mu$ presentation, Sagem DS will present different "complex" cases of mostly aeronautical profiles and some militaries to illustrate the application of the proposed method.

1. Rappel saisie des cyclages en température FIDES

Les variations de température les plus communément rencontrées dans la vie des produits électroniques embarqués sont les suivantes :

- Variation de température jour/nuit pour les produits stockés/parqués en extérieur ou dans un local non isolé thermiquement
- Elévation de température liée à l'allumage du produit par échauffement interne des composants électroniques et ce de manière « cyclique » lorsque le produit est allumé régulièrement.
- Variations thermiques liées à l'utilisation de l'équipement qui peuvent être positives (par exemple pour un produit placée à proximité d'un moteur) ou négative (par exemple pour un produit monté sur avion lors des phases de décollage) et ce de manière cyclique ; calqué sur le cycle d'utilisation du produit.

Lors de la construction du profil de vie, le guide FIDES propose une méthode pour la saisie des cyclages en température subis par le produit. Il s'agit de définir 4 paramètres principaux qui définissent les variations « cycliques » en température que subit le produit au court de ses différentes phases de vie.

- Nombre de cycle sur l'année (Quantité)
- La température maximale du cycle ($^{\circ}\text{C}$).
- Amplitude du cyclage en température ΔT ($^{\circ}\text{C}$).
- La durée du cyclage θ_{cycle} (heures).

1.1. Nombre de cycle sur l'année

Une variation de température périodique se reproduira un certain nombre de fois au court du profil de vie du produit (par exemple cycle jour/nuit reproductible 365 fois sur l'année)

1.2. La température maximale du cycle (°C)

La température maximale du cycle est la température la plus haute atteinte au court du cycle. Cette température peut être positive comme négative.

1.3. Amplitude du cyclage en température ΔT (°C)

L'amplitude du cyclage en température est la différence (absolue) entre une température repère et la température extremum d'une ou plusieurs phases. La température repère est une température initiale par laquelle le cycle part et revient de façon périodique en passant par la température extremum.



Figure 1. Illustration amplitude du cyclage en température

Lors d'une variation positive, la température maximale est souvent l'extremum du cycle. Lors des variations négatives, la température maximale est souvent la température repère.

1.4. Durée du cyclage en température

La durée du cyclage en température (θ_{cycle}) est le temps passé entre deux passages par les températures repères au sein d'un cycle. A ne pas confondre avec la durée d'une phase du profil car plusieurs phases peuvent subir un seul et même cycle (voir exemple donné dans FIDES 2009 §3.2.7. *Grappe*). Les phases de décollage et d'atterrissage d'un produit monté sur avion par exemple peuvent être deux phases distinctes mais peuvent également subir le même cyclage en température, une variation négative. Pour ce cas de figure, la durée du cycle sera égale à la somme des durées des phases (hors notion d'inertie thermique).

1.5. Exemple de saisie d'un profil simple

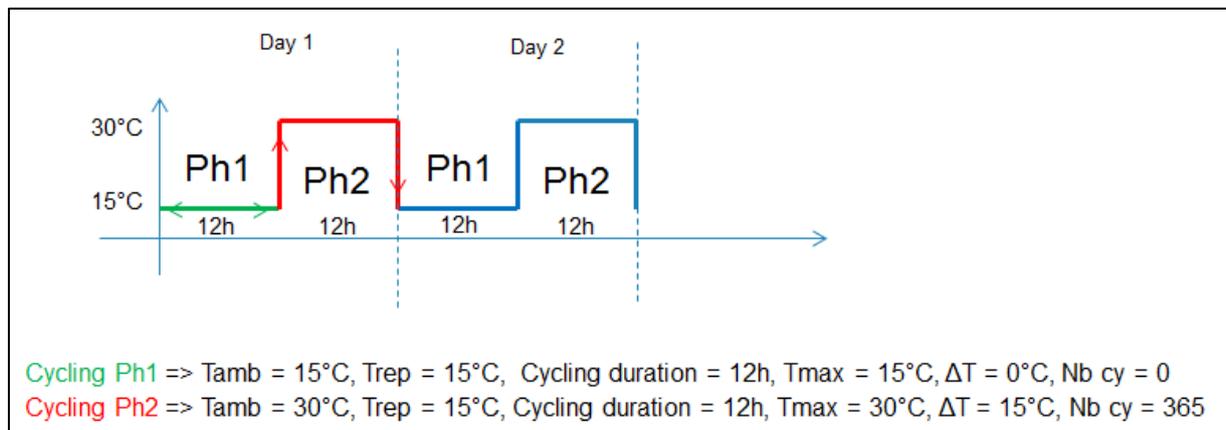


Figure 2. Exemple de saisie d'un profil simple à 2 phases

Deux phases sont présentes dans ce profil de température. La première phase ne subit aucun cyclage en température ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$ et Nb cycle = 0). La deuxième phase subit un cyclage en température d'une durée de 12h pour une élévation de température de 15°C par rapport à la température repère qui est de 15°C .

2. Problématique des profils dit « complexes »

2.1. Problématique des cyclages par retour simultanés

La méthode présentée dans le guide FIDES pour la définition des cyclages en température permet la saisie des variations de température relativement simple. Il s'agit de variations de température graphiquement symétriques, présentant rarement plus d'une dizaine de variations. Certains cycles imbriqués ou par retour simultanés ne peuvent pas être pris en compte dans leur intégralité car la variation doit être considérée par partie avec la méthode « classique ».

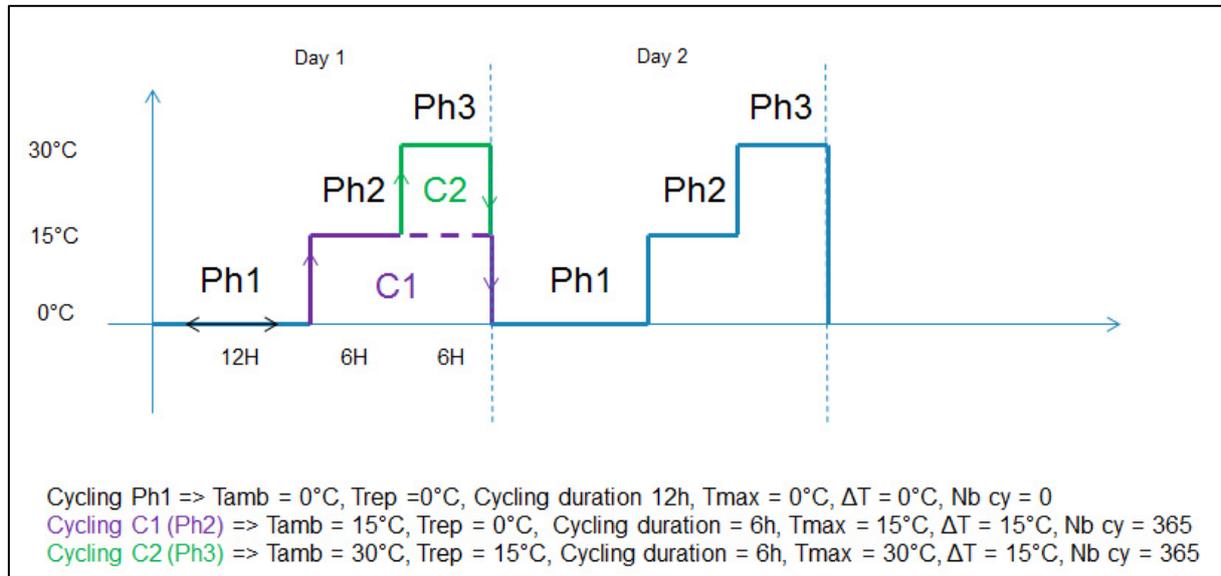


Figure 3. Problématique cyclages par retour simultanés 1

Dans l'exemple qui est proposée ci-dessus, la phase 3 présente un retour simultané avec la phase 2 sur la phase 1. Dans ce cas de figure, l'amplitude du cyclage en température est défini « par partie »; pour le premier cyclage de 0°C à 15°C et pour le deuxième de 15°C à 30°C .

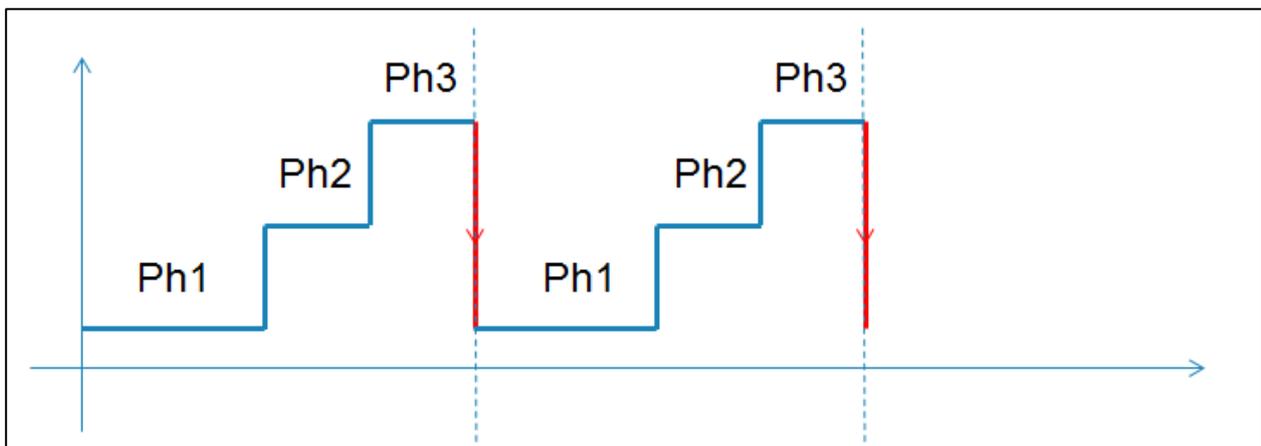


Figure 4. Illustration problématique cyclages par retour simultanés 2

L'application de la méthode « classique » de définition des cyclages en température ne permet pas la prise en compte de l'entière variation de la température de la phase 3 à la phase 1 qui est de 30°C . L'impact sur le calcul de fiabilité des composants électroniques des cyclages définis « par partie » (2 fois 15°C) n'est pas le même que l'impact d'un unique cyclage de 30°C d'amplitude. Il va de soi que pour que la prédiction de fiabilité soit la plus juste possible, il faut nécessairement que le profil de vie codé dans le modèle de fiabilité soit le plus réaliste possible.

2.2. Problématique des profils dits « complexes »

Pour certaines applications à fort enjeu de disponibilité (aéronautique, aérospatial, etc.) ; un intérêt tout particulier est porté aux profils de vie qui ont une forte influence sur la fiabilité des systèmes électroniques. Les profils sont décrits de plus en plus finement afin d'optimiser le profil d'utilisation du produit ou apporter des mesures physiques correctives (couvertures isolantes, refroidisseurs). Une description plus fine implique une plus grande complexité du profil où l'on voit se multiplier le nombre de phases, les variations thermiques entre phases, nombre de périodicité différentes, etc.

L'application de la méthode « classique » de FIDES peut présenter certaines difficultés, notamment lors de la définition des températures repères pour la définition de chaque cycle en température. Sur certains profils, il est possible de saisir de plusieurs manières différentes les cyclages en température (exemple ci-dessous d'équipement aéronautique pour un profil de 2 vols par jour, système de freinage) :

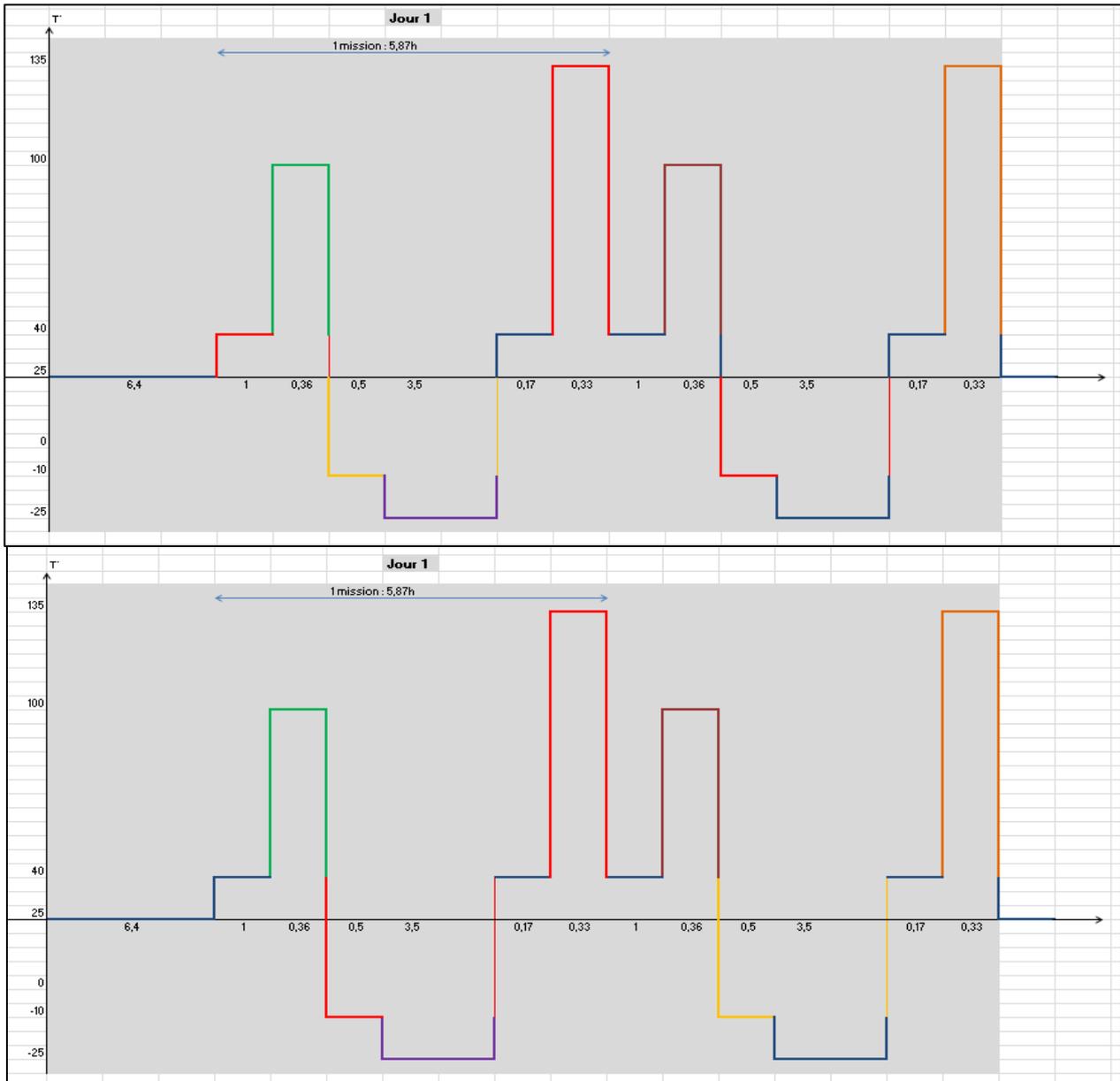


Figure 5. Application méthode « classique » sur profil complexe

Les codages des cyclages qui découleront des deux manières différentes de saisie n'auront pas le même impact sur la fiabilité des composants électroniques. Dans les deux cas, la méthode FIDES est respectée : chaque cycle défini commence à une valeur repère, passe par un extremum et revient à cette même valeur repère. Il n'y a pas de discontinuité dans la prise en compte des variations de température. Les deux manières de saisir les cyclages peuvent correspondre à deux manières différentes de voir les réalités temporelles des phases du profil ou les phénomènes générant les contraintes.

3. Méthode Sagem de projection des cyclages sur 2 périodes

La périodicité d'un profil peut être une journée (par exemple pour un cycle journalier d'un avion court-courrier) ; plusieurs jours (par exemple pour des avions longs courriers) ; ou bien à l'inverse quelques heures (pour certains hélicoptères). Sagem a élaboré une méthode qui permet de prendre en compte exhaustivement l'intégralité des variations de température des profils les plus complexes et ce dans un temps relativement réduit. Il s'agit de projeter la saisie des cyclages en température sur deux périodes du profil de vie. Cette projection sur deux périodes permet de répondre aux deux problématiques précédemment citées.

3.1. Application de la méthode Sagem sur la problématique des profils par retour simultanée :

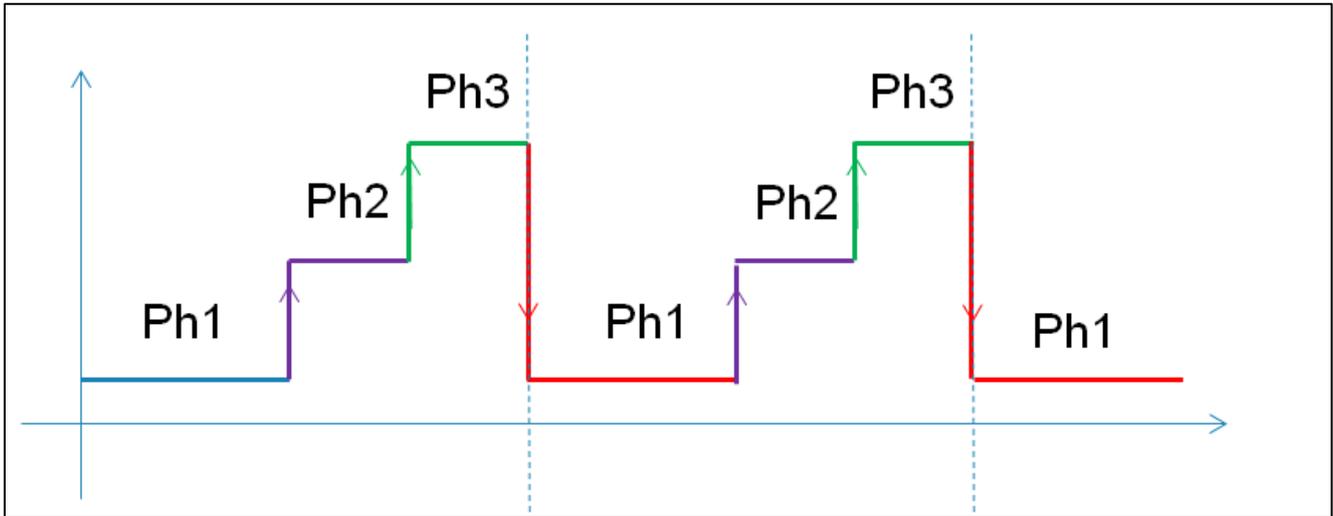


Figure 6. Méthode Sagem sur la problématique des profils par retour simultanée

Les cyclages en température sont projetés sur deux périodes. Ainsi l'entière variation de température entre Ph3 et Ph1 est prise en compte.

La projection du cyclage en température sur deux périodes implique de prendre en compte techniquement deux fois plus de variations thermiques que par la méthode « classique » mais la durée des cyclages se voit également multipliée par deux et donc le nombre de cycle sur la durée du profil est deux fois plus faible. La méthode s'équilibre ainsi d'elle-même et reste cohérente avec la méthode « classique ».

Cette méthode revient à la définition même de ce qu'est un cycle thermique dans FIDES et sa prise en compte dans les modèles de fiabilité : une variation thermique entre une température repère et un extremum, une température max du cycle et deux fois la variation thermique (quel que soit le sens car l'amplitude est absolue).

3.2. Application de la méthode Sagem sur la problématique des profils dit « complexes » :

Cette méthode permet également de saisir de manière automatique les cyclages en température phase après phase en ne se focalisant que sur la variation de la phase en question et sa projection sur deux périodes sans chercher à élaborer un retour à la température repère comme dans la méthode « classique ». Cette saisie automatique simplifiée permet tout d'abord un gain de temps mais surtout une cohérence sur la méthode de saisie entre deux applications différentes.

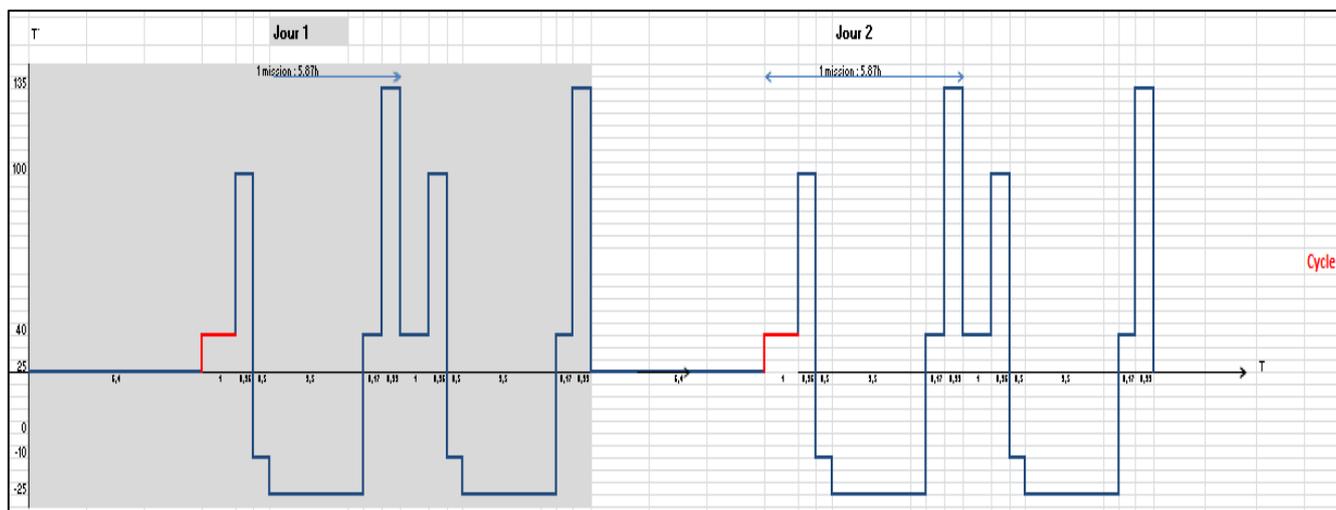


Figure 7. Projection sur deux périodes du profil complexe

Le cycle 1 est représenté en rouge et est projeté sur deux périodes du profil de vie. Chaque cycle s'applique à chaque variation de température en projection sur deux périodes. Il y aura ainsi autant de cycle que de variation de température.

Hypothèse d'un profil moyen à 2 vols par jour						Cyclage thermique				
Nom des phases	Durée moyenne des phases en (min)	Temps calendaire	On/Off	Température ambiante	Tamb (hypothèse d'élévation temp interne +15°C)	Nom du cyclage	ΔT°C	Nb de cycle	Durée du cycle (hors inertie) en (h)	Tmax au cours du cyclage
Pre-Flight	60	365,0	ON	25	40	cycle 1	15	182,5	2,00	40
Taxi Out	22	133,8	ON	85	100	cycle 2	60	182,5	0,73	100
Take Off						cycle 3	110	182,5	1,00	100
Climb	30	182,5	ON	-25	-10	cycle 4	15	182,5	11,00	-10
Cruise	330	2007,5	ON	-40	-25	cycle 5	65	182,5	0,33	40
Descent						cycle 6	95	182,5	0,67	135
Approch & Landing	10	60,8	ON	25	40	cycle 7	95	182,5	2,00	135
Taxi IN	20	121,7	ON	120	135	cycle 8	60	182,5	0,73	100
Pre-Flight 2	60	365,0	ON	25	40	cycle 9	110	182,5	1,00	100
Taxi Out 2	22	133,8	ON	85	100	cycle 10	15	182,5	11,00	-10
Take Off 2						cycle 11	65	182,5	0,33	40
Climb 2	30	182,5	ON	-25	-10	cycle 12	95	182,5	0,67	135
Cruise 2	330	2007,5	ON	-40	-25	cycle 13	110	182,5	16,53	135
Descent 2										
Approch & Landing 2	10	60,8	ON	25	40					
Taxi IN 2	20	121,7	ON	120	135					
Dormant	496	3017,3	OFF	10	25					

Table 1. Codage du profil complexe par la méthode Sagem

Après simplification des phases similaires entre elles, ci-dessous le codage simplifié du profil :

Simplification

Nom des phases	Durée moyenne des phases en (min)	Temps calendaire	On/Off	Température ambiante	Tamb (hypothèse d'élévation temp interne +15°C)	Cyclage thermique				
						Nom du cyclage	ΔT°C	Nb de cycle	Durée du cycle (hors inertie) en (h)	Tmax au cours du cyclage
Pre-Flight	60	730,0	ON	25	40	cycle 1	95	365,0	2,00	135
Taxi Out	22	267,7	ON	85	100	cycle 2	60	365,0	0,73	100
Take Off						cycle 3	110	365,0	1,00	100
Climb	30	365,0	ON	-25	-10	cycle 4	15	365,0	11,00	-10
Cruise	330	4015,0	ON	-40	-25	cycle 5	65	365,0	0,33	40
Descent						cycle 6	85	365,0	0,67	125
Approch & Landing	10	121,7	ON	25	40	cycle 13	100	182,5	16,53	125
Taxi IN	20	243,3	ON	120	125					
Dormant	496	3017,3	OFF	10	25					

Table 2. Codage simplifié du profil complexe par la méthode Sagem

Les températures en orange sont volontairement plafonnées à 125°C qui est la limite haute pour rester dans la gamme de température d'applicabilité des cyclages thermique du modèle FIDES (information qu'il conviendra de mentionner en hypothèse de l'étude). Egalement le ΔT du Pre-Flight 2ème vol (95°C) s'applique en pire des cas face au Pre-Flight 1er vol (15°C) lors de la simplification.

4. Application numérique

4.1. Saisie d'un profil simple

En reprenant l'exemple d'un profil très simple représenté par deux phases avec deux températures différentes, on constate déjà une différence dans les paramètres de saisie des cyclages :

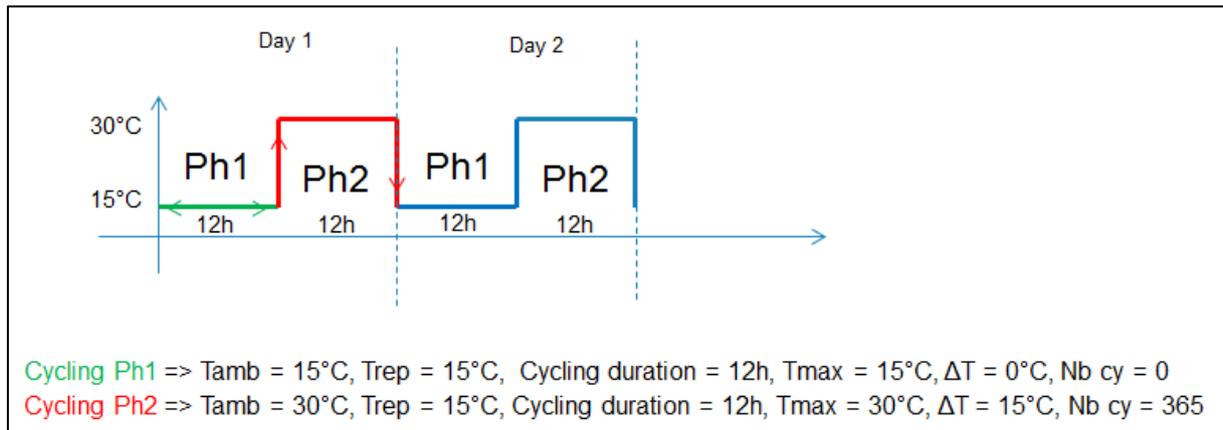


Figure 8. Saisie du profil simple à deux phases par la méthode « classique »

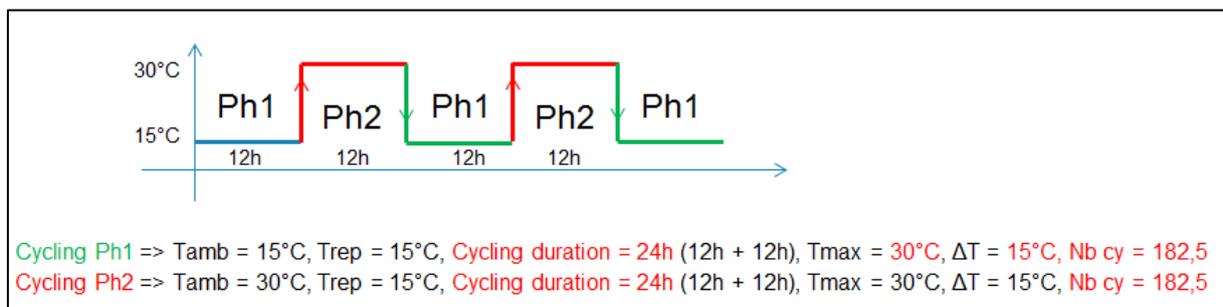


Figure 9. Saisie du profil simple à deux phases par la méthode Sagem

Un cyclage supplémentaire a été codé mais la durée des deux cyclages a été « allongée » (de 12h à 24h) et le nombre de cycle sur l'année est deux fois plus faible.

4.2. Application numérique sur le profil simple

L'étude est menée sur une fonction (251 composants) d'un équipement aéronautique constituée des familles de composants ci-dessous :

- 147 résistances
- 79 condensateurs
- 24 circuits intégrés
- 1 FPGA

L'outil utilisé est FIDES Expertool et hormis la température, tous les autres paramètres sont identiques entre les deux profils de la méthode « classique » et de la méthode Sagem (les Pis, le vibratoire, humidité, etc.).

Le résultat obtenu pour l'application des deux méthodes ci-dessus est identique à 13 décimales près (la limite de l'outil) : 86,8 FITs.

4.3. Application numérique sur un profil plus complexe

Application numérique sur un autre profil, mais cette fois un peu plus complexe que le précédent :

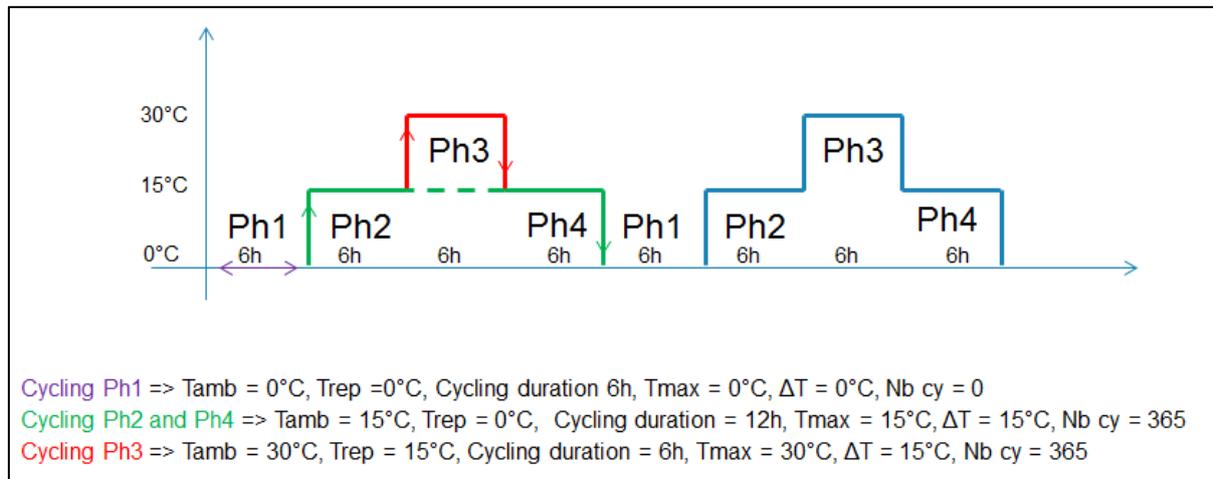


Figure 10. Saisie du profil plus complexe par la méthode « classique »

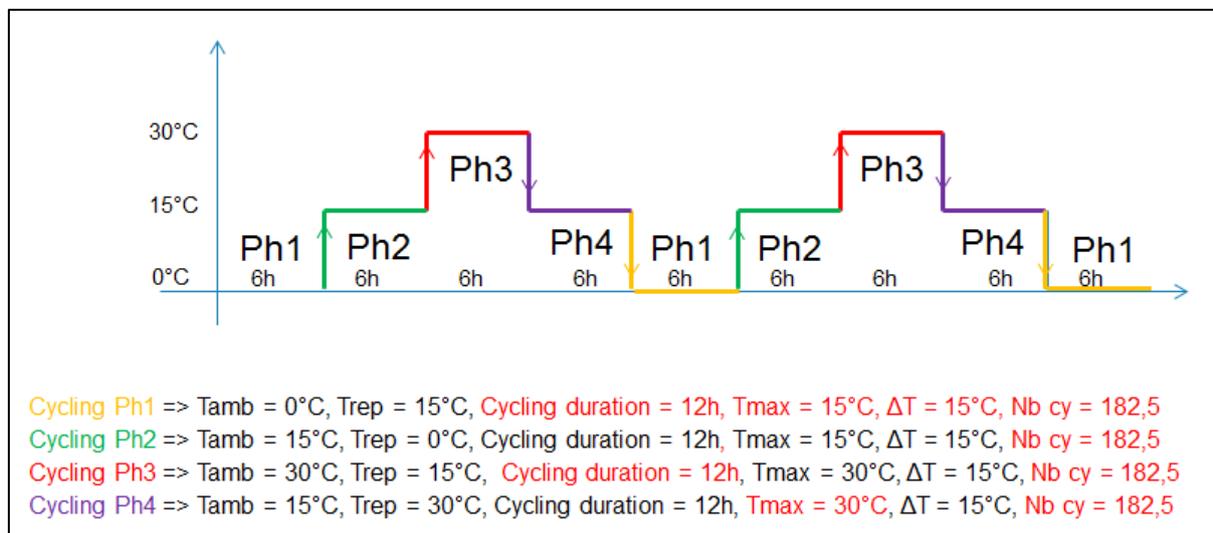


Figure 11. Saisie du profil plus complexe par la méthode Sagem

Pour la même fonction que précédemment, le résultat obtenu pour l'application des deux méthodes ci-dessus est identique à 13 décimales près (la limite de l'outil) : 115,28 FITs.

5. Conclusion

Sagem a expérimenté la méthode dans un premier temps sur des profils simples afin de s'assurer de sa conformité à la méthode dite « classique » de FIDES. Il faut en effet pour que la comparaison soit possible, que les profils saisis ne présentent pas de cas des complexités précédemment cités. A chaque fois, les prédictions de fiabilité sont identiques et ce quel que soient les composants ciblés car en réalité, à chaque fois le profil est identique (il est simplement saisi sous une forme différente). Sagem a également appliqué la méthode sur des profils complexes issus de ses projets en aéronautique et dans le militaire. Aucune difficulté n'a été rencontrée lors de l'expérimentation de la méthode.

5.1. Les avantages de la méthode :

- Elle permet une saisie rapide car elle s'applique systématiquement sur toutes les phases
- Elle peut s'appliquer à n'importe quel cas de profil complexe
- Elle permet de conserver les caractéristiques du cyclage en température requises par les profils FIDES :
 - Nombre de cycle sur l'année (deux fois plus faible : considéré sur deux périodes sur l'année)
 - La température maximale du cycle (°C).
 - Amplitude du cyclage en température ΔT (respecte la définition du guide FIDES en considérant les températures repères et deux variations => quelque que soit leur sens).
 - La durée du cyclage θ_{cycle} (deux fois plus importante : projetée sur deux périodes).

5.2. L'inconvénient de la méthode:

Cette méthode n'est vérifiable que sur des profils relativement simples pour lesquels il n'y a pas de difficulté dans l'application de la méthode dite « classique » de saisie des cyclages en température.

6. Remerciements

Merci en premier lieu à Charles Grenouilloux pour avoir initié la méthode lors de nos investigations dans la saisie des profils complexes et pour son soutien lors de la présentation de cette méthode au groupe de travail FIDES. Merci enfin à Claudine Barruet et Noémie Vauthelin pour leur conseils durant l'élaboration de cette étude.

7. Références

FIDES guide 2009 (Reliability Methodology for Electronic Systems)