Conception d’un système de loi de commande fondée sur l’état de santé du procédé consacrée aux propulseurs réutilisables

Rédigé par : Mohammed CHELOUATI

Encadré par :

Mayank JHA

Didier THEILLIOL

20/09/2020

Sommaire

Table des figures 3

Tables des tableaux 4

Remerciements 4

I - Introduction : 5

II - Présentation des entreprises impliquées 5

I. Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) : 5

II. Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) : 7

III - Contexte général du stage : 8

IV - Analyse bibliographique : 9

I. Base de données : 9

II. Statistiques des articles : 10

V - Traitement des données : 13

I. Description du moteur : 14

I.1 Performances du moteur : 15

I.2 Description et modélisation de la dégradation : 15

VI - Estimations du Filtre de Kalman Etendu (EKF) 18

I. Fonctionnement des Filtres de Kalman Etendu : 18

II. Application des filtres de Kalman Etendu aux données du CNES : 19

III. Génération de la Durée de Vie Résiduelle (RUL) : 23

VII - Intégration des entrées : 27

I. Résultats des estimations EKF : 29

II. Résultats des RULs : 32

VIII - Perspectives et conclusion : 34

Résumé : 35

Résumé (anglais) : 35

BIBLIOGRAPHIE 36

Annexes 37

Table des figures

Figure 1 : Organigramme du CRAN 6
Figure 2 : Construction des combinaisons de mots clés 10
Figure 3 : Pourcentage des articles trouvés sur chaque base de données 11
Figure 4 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé IEEE 11
Figure 5 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé Elsevier 12
Figure 6 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé AIAA 12
Figure 7 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé Taylor & Francis Online 12
Figure 8 : Synoptique moteur 14
Figure 9 : Perte de la charge singulière à travers le CR 16
Figure 10 : Dégradation du rendement de la vitesse caractéristique 16
Figure 11 : Dégradation etaC* calculé et mesuré pour les moteurs FM 17
Figure 12 : Dégradation etaC* calculé et mesuré pour les moteurs QM 18
Figure 13 : Résultats des estimations EKF de etaC* pour les moteurs FM 21
Figure 14 : : Résultats des estimations EKF de etaC* pour les moteurs QM 22
Figure 15 : Illustration de la Durée de Vie Résiduelle 23
Figure 16 : Algorithme de la RUL 24
Figure 17 : Seuils prédéterminés pour chaque moteur FM 25
Figure 18 : Résultats de la RUL pour les moteurs FM 25
Figure 19 : Seuils de défaillance choisis pour les moteurs QM 26
Figure 20 : Résultats de la RUL pour les moteurs QM 27
Figure 21 : Résultats des estimations EKF pour les moteurs FM1 et FM2 30
Figure 22 : Résultats des estimations EKF pour les moteurs QM1 et QM2 31
Figure 23 : Algorithme de la RUL avec l'hypothèse 1 32
Figure 24 : RUL pour les moteurs FM1 et FM2 avec entrée (hypothèse 1) 32
Figure 25 : RUL des moteurs QM1 et QM2 avec entrée (hypothèse 1) 33

Tables des tableaux

Tableau 1 : Nombre d'articles sur chaque base de données 10

Tableau 2 : Performances moteur 15

Tableau 3 : Paramètres réglant la modélisation de la fuite CR/chambre 16

Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il est important de commencer ce rapport par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de ce stage, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ce stage un moment très profitable. Je remercie Dr Jha et Dr Theilliol, mes maitres de stage qui m'ont formé et accompagné tout au long de cette expérience professionnelle avec beaucoup de patience, de pédagogie, et de bonne humeur.

Je remercie tous les professeurs de Polytech Nancy pour leur accueil chaleureux, leur gentillesse, leur patience et leur bonne humeur générale. J'ai eu le grand plaisir à étudier au sein de l'école et cette première véritable expérience m'a été favorable.

I - Introduction :

Les systèmes dynamiques doivent réaliser leur mission avant l'occurrence de défaillances des composants, ce qui est inévitable si les composants subissent des dégradations progressives. Ainsi dans ce domaine d'études, la conception de lois de commandes vise un compromis optimal entre les performances souhaitées du système et la durée de vie résiduelle de ses composants critiques.

Dans ce contexte, une méthode hybride d'estimation des variables d'état basée sur le Filtre de Kalman Etendu (EKF) a été développé en utilisant des données de simulation. L'estimation de ces paramètres seront utilisées par la suite pour prédire la durée de vie résiduelle (RUL) afin de prendre en compte des mesures correctives avant la défaillance. Les travaux réalisés pendant ce stage, tentent également de résoudre le problème de l'impact des conditions opérationnelles sur la dégradation du système. Pour cela, les estimations de l' état de santé et de la dynamique de dégradation qui permettent de calculer la durée de vie résiduelle sont générés tout en tenant compte aux conditions de fonctionnement du système.

II - Présentation des entreprises impliquées

I. Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) :

Créé en 1980, le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) est une unité mixte de recherche (UMR 7039) commune à l'université de Lorraine (UL) et au CNRS. Il accueille également des chercheurs de l'Institut Cancérologie de Lorraine (ICL) et du CHU.

Au 1er janvier 2020, le laboratoire compte 107 enseignants-chercheurs, 4 émérites, 9 chercheurs CNRS, 10 autres chercheurs de l'UL, de l'ICL et du CHU ou d'organismes externes, 11 post-docs, 73 doctorants et 32 (dont 28 CDI et 4 CDD) ingénieurs, techniciens ou administratifs. Il fait partie de la Fédération de Recherche Charles Hermite Automatique, Informatique, Mathématiques de Lorraine et du pôle scientifique Automatique, Mathématiques, Informatique et leurs Interactions (AM2I) de l'université de Lorraine.

Les recherches menées au CRAN concernent l'Automatique définie comme la science de la modélisation, de l'analyse, de la commande et de la supervision des systèmes dynamiques mais aussi le traitement du signal et le génie informatique.
Avec l'intégration en 2013 d'une EA de biologie, et en s'appuyant sur les forces historiques de l'unité, le CRAN mène également des recherches interdisciplinaires associant l'automatique, le traitement du signal et de l'Image avec la biologie et la médecine.

Le laboratoire développe des activités transverses à ces disciplines dans les domaines de l'ingénierie pour la santé et de la sûreté de fonctionnement des systèmes. Ces domaines de recherche, fondés sur les concepts de signaux (classiques et biomédicaux), systèmes dynamiques (physiques ou biologiques), biologie intégrative, réseaux (informatiques ou de signalisation en biologie), information et décision, concernent à la fois les systèmes techniques (processus industriels, systèmes de transport, production d'énergie, réseaux de communication, ...), les systèmes environnementaux (qualité de l'air, l'eau, ...) et la santé (diagnostic et soins en cancérologie et neurologie). Les retombées de ces recherches ont un impact tant « sociétal » (amélioration de la sûreté des installations, des diagnostics et des soins en médecine ou de l'environnement), qu'économique (amélioration du rendement des installations, des actes médicaux, des produits ou des services).

La figure (1) présente l'organigramme et la structure du CRAN.

Le sujet de stage rentre dans le cadre du département Contrôle-Identification-Diagnostic (CID)

Le département CID regroupe l'ensemble des activités de recherche du CRAN portant sur l'Automatique des systèmes dynamiques continus et cyber-physiques. Un large panel de thématiques est couvert et inclut notamment : la modélisation, l'identification, l'analyse, le contrôle, l'observation, le diagnostic et la tolérance aux fautes.

Les travaux de recherche du département CID sont majoritairement de nature théorique et méthodologique en utilisant une large gamme d'outils mathématiques et de modèles physiques dédiés à la théorie des systèmes pour répondre aux défis majeurs engendrés par la complexité et l'intégration croissantes des systèmes. Cette abstraction et l'utilisation d'outils communs constituent un lien fort et cohérent dans le département CID.

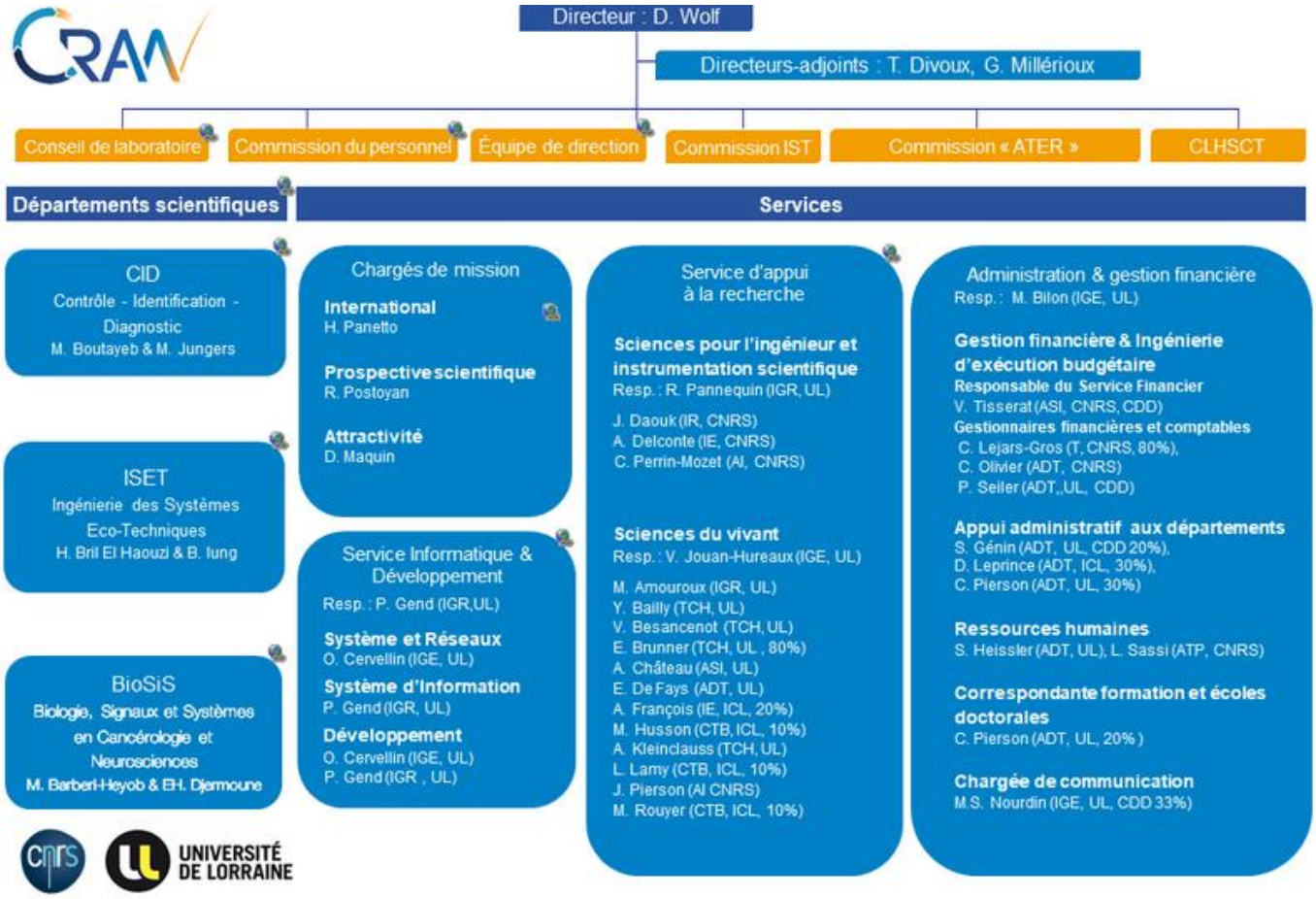

Figure 1 : Organigramme du CRAN

II. Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) :

Le centre National d'Etudes Spatiales (CNES) est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) chargé d'élaborer et de proposer au gouvernement français le programme spatial français et de le mettre en œuvre. Le CNES dispose d'un budget de 2,438 milliards d'euros en 2018, ce qui reste le plus important en Europe (38 à 39 euros par habitant en 2018). Il inclut la part reversée à l'Agence spatiale européenne, dont le CNES est le plus gros contributeur (965 millions d'euros en 2018), qui est consacrée essentiellement aux missions scientifiques (astronomie, exploration du système solaire, étude de la Terre) et aux investissements dans les lanceurs. La part investie directement par le CNES porte dans l'ordre d'importance sur les lanceurs et la gestion de la base de lancement de Kourou (324 M€, 17 %), les missions militaires (269 M€, 14 %), scientifiques (167 M€, 9 %), l'étude de la Terre généralement dans le cadre de coopérations binationales (120 M€, 6 %), les développements autour des satellites de télécommunication et de navigation par satellite (42 M€, 2 %). Le CNES est placé sous la tutelle conjointe des ministères de la Recherche et des Armées.

Le CNES a été créé à l'initiative du président Charles de Gaulle le 19 décembre 1961 afin de fournir une structure chargée de coordonner et animer les activités spatiales françaises centrées à l'époque sur le développement du lanceur-fusée Diamant. Le CNES est toujours en 2018 l'agence spatiale nationale la plus importante des pays de l'Union européenne.

Le CNES travaille en collaboration avec Arianespace (Évry) et l'Agence spatiale européenne (ESA), sur cinq domaines d'activité :

- Accès à l'espace (lanceurs)
- Terre, environnement et climat (sciences et innovation pour le développement durable)
- Applications grand public (télécoms et navigation)
- Science et innovation (pour l'astronomie et la physique fondamentale)
- Sécurité et Défense

Le Centre National d'Études Spatiales est à l'origine de quantité de projets spatiaux, même si ce n'est pas lui qui fabrique les lanceurs ou les satellites. Dans le cas des lanceurs, après avoir conçu la filière Ariane, le CNES agit aujourd'hui comme autorité de conception et de qualification pour le compte de l'État français qui est l'État de lancement. Le CNES joue aussi le rôle d'assistant au maître d'ouvrage, l'Agence spatiale européenne pour les nouveaux développements.

III - Contexte général du stage :

Le besoin de réduction des couts d'un moteur fusé à propulsion liquide (LPRE) a conduit à l'introduction de la réutilisation dans son cycle de vie nominale. Cette nouvelle exigence ainsi que l'effort constant d'amélioration des performances et de réduction de la masse obligent à une réflexion de plus en plus poussée sur la possibilité de considérer des systèmes de surveillance de l'état de dégradation du moteur qui soient aussi capables d'une reconfiguration de leur point de fonctionnement en cas de détection d' un défaut et/ou d'une panne. Ces systèmes devraient aussi prendre en compte la prédiction de l'état de dégradation du moteur ainsi qu'une estimation de sa durée de vie (RUL). Des systèmes de commande « conscient » de l'état de dégradation du moteur et/ou de ses composants pourraient être déployés sur cette nouvelle génération de moteurs fusée pour permettre un control qui se base à la fois sur l'état actuel et sur la prévision de l'état future de dégradation du moteur. L'étude portera sur une synthèse des méthodes ou stratégies existantes dans la littérature et s'attachera, à partir d'un modèle simplifié du moteur de fusée à propulsion liquide, de déployer la ou les méthodes les plus pertinentes afin d'évaluer les performances intrinsèques du Health Aware Control. L'étude s'effectuera en étroite collaboration avec le CNES selon trois étapes principales :

1. L'Etude de l'état de l'art et développement d'un modèle prédictif sur un cas d'application « académique » : cet état de l'art considérera l'ensemble des techniques de traitement du signal sans omettre de considérer l'ensemble des approches à base de modèle et de données dans le contexte des lanceurs. Une base re références bibliographiques les plus récentes sera à considérer pour établir une veille scientifique sur le modèle prédictif à des fins de diagnostic ou de pronostic.

2. Etude de l'état de l'art et proposition de l'intégration du modèle de dégradation développé précédemment dans la synthèse de la loi de commande optimale : formalisation du problème de commande optimale intégrant la modélisation de la dégradation des composants critiques sous la forme d'un processus capable de calculer une commande optimale intégrant les caractéristiques de santé des composants. La résilience d'une boule fermée et les méthodes développées seront explorées d'un point de vue bibliographique lors de cette étape.

3. Prémisse d'extraction des caractéristiques de dégradation de la chambre de combustion (abrasion parois interne et apparition des microfissures) d'un système de propulsion fusée à ergol liquide cryogéniques en boucle fermée à partir d'un système de simulation : extraction des caractéristiques de dégradation sensible aux conditions opérationnelles (poussée, décollage/atterrissage). Les modèles construits doivent pouvoir prédire l'état de santé en fonction de l'état actuel (diagnostic) et des données d'entrée (conditions de fonctionnement). La plateforme de simulation utilisée pour constituer les jeux de données de validation des quelques méthodes testées sur le volet diagnostic / pronostic sera fournie par le CNES

IV - Analyse bibliographique :

Cette partie portera sur une étude de l'état de l'art de l'ensemble des approches de pronostic (basées sur les données et sur les modèles, ainsi que les approches hybrides) dans le contexte des lanceurs, et la construction d'une base de références bibliographiques pour avoir une veille scientifique sur les modèles prédictifs à des fin de pronostic & diagnostic

I. Base de données :

Pour construire une base de références bibliographiques, il fallait choisir les bases de données les plus proches de la thématique de sujet, ainsi que les bases les plus connues qui couvrent plusieurs domaines. Les bases de données utilisées sont présentées ci-dessous :

- **Institute of Electrical and Electronics Engineers : 5 084 324 Articles**
- **Elsevier ScienceDirect : 14 millions articles**
- **American Institute of Aeronautics and Astronautics: 200 000 articles**
- **Taylor & Francis Online : 4 200 000 articles**

Aerospace Research Central (base de donnée de l'AIAA)

Pour focaliser nos recherches, nous avons cherché les différentes conférences et journaux qui sont en relation avec notre thématique pour chaque base de données. Les résultats de ces recherches sont les suivants :

L'étape suivante consistait sur la combinaison de mots clés qu'il fallait utiliser sur les différentes bases de données choisies. Pour cela nous nous sommes basés sur quatre familles de mots clés : « Pronostic », « Diagnostic », « lanceurs », et « réutilisable ».

La figure ci-dessous montre la construction des combinaisons selon les quatre familles :

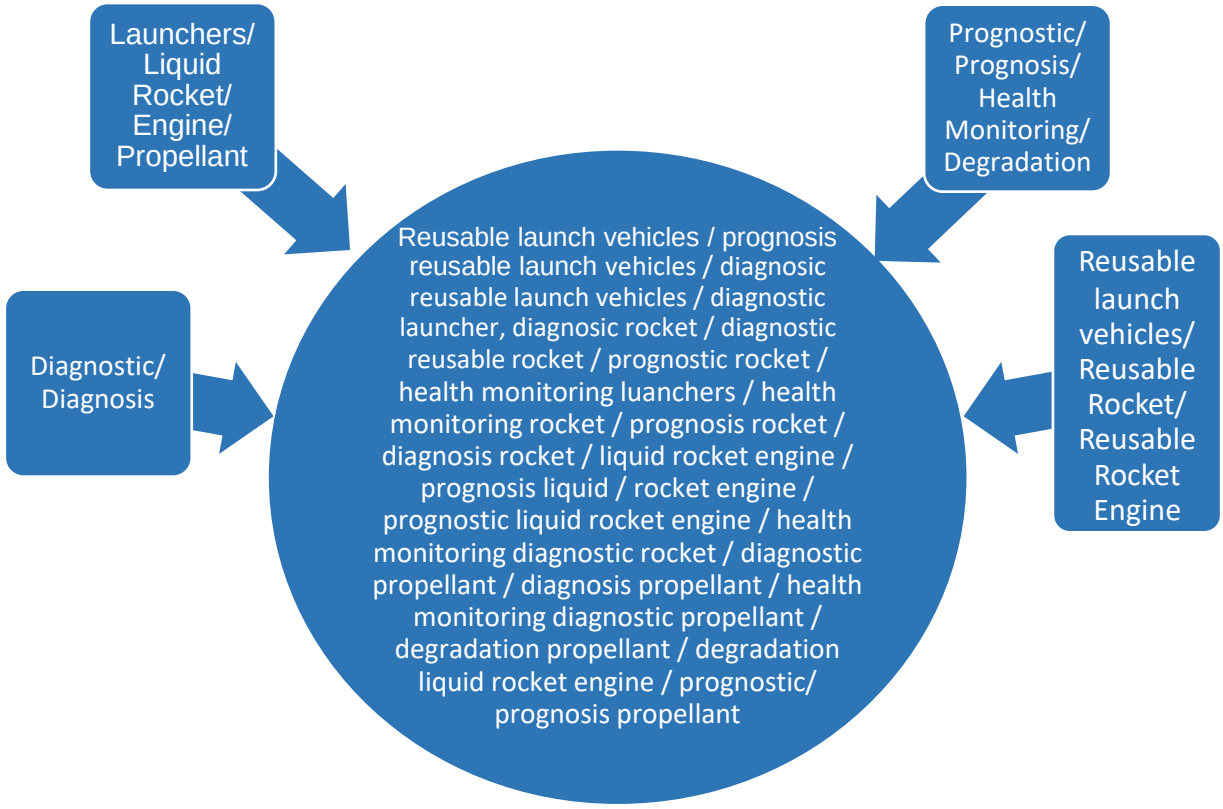

Figure 2 : Construction des combinaisons de mots clés

II. Statistiques des articles :

Après avoir choisir les bases de données et les combinaisons de mots clés, une construction d'un fichier Excel contenant les différentes statistiques a été envisagée.

Les nombres d'articles totaux trouvés sur chaque base de données et les pourcentages associés sont représentés ci-dessous :

Revue	Nombre d'articles trouvés		Dates des articles trouvés
IEEE	930		1962/2020
AIAA	865		1970/2020
Science Direct	354		1971/2019
Taylor & Francis Online	21		1994/2019
Total	2170		1962/2020

Tableau 1 : Nombre d'articles sur chaque base de données

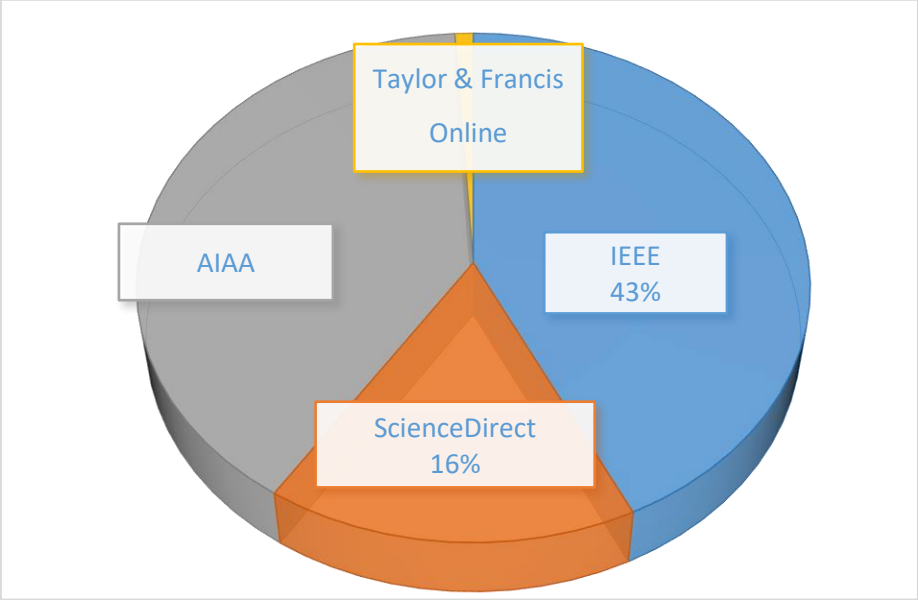

Figure 3 : Pourcentage des articles trouvés sur chaque base de données

Nous remarquons que les pourcentages importants des articles trouvés à travers les combinaisons de mots clés ont été trouvés sur IEEE et AIAA, cela peut être expliqué par l'ancienneté de la base IEEE et la proximité de notre sujet avec les recherches de la base AIAA.

Ensuite pour détailler nos recherches, nous présentons sur les figures suivantes, le nombre d'articles de chaque mot clé sur l'ensemble des bases de données.

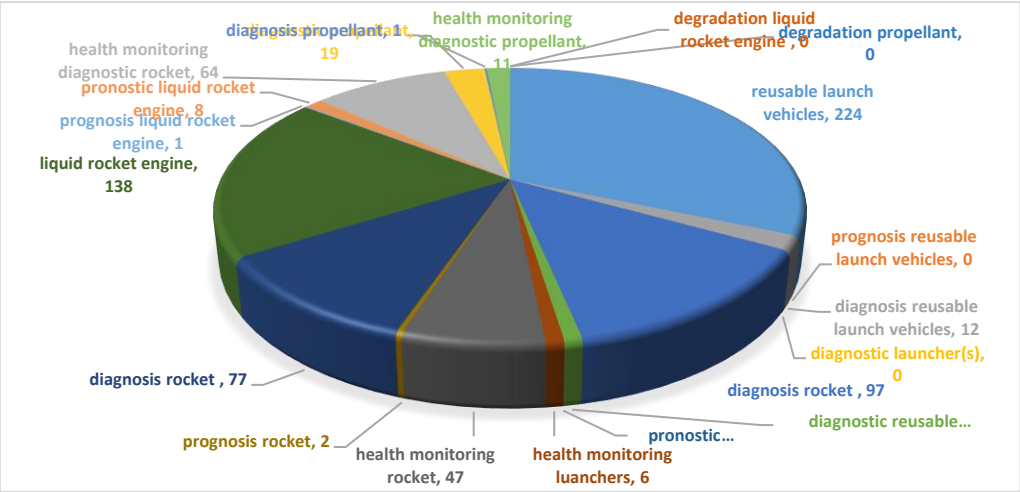

Figure 4 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé IEEE

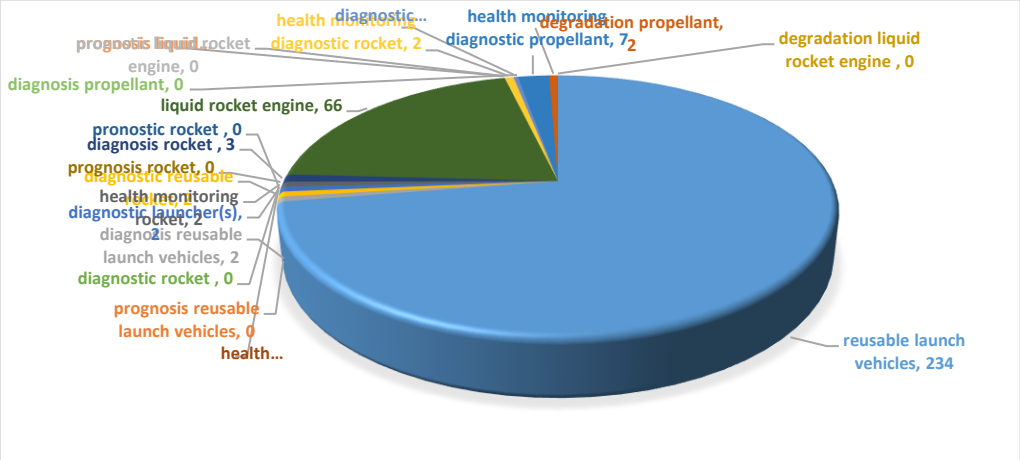

Figure 5 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé Elsevier

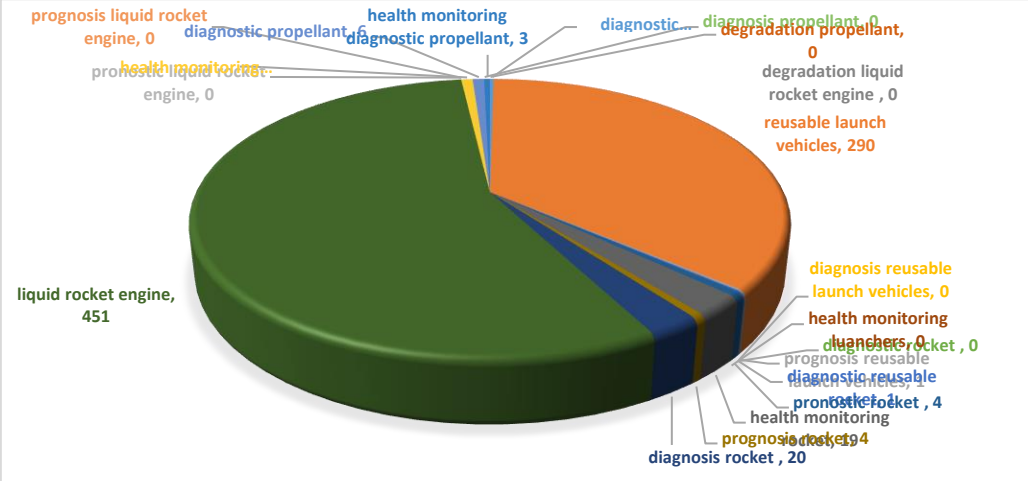

Figure 6 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé AIAA

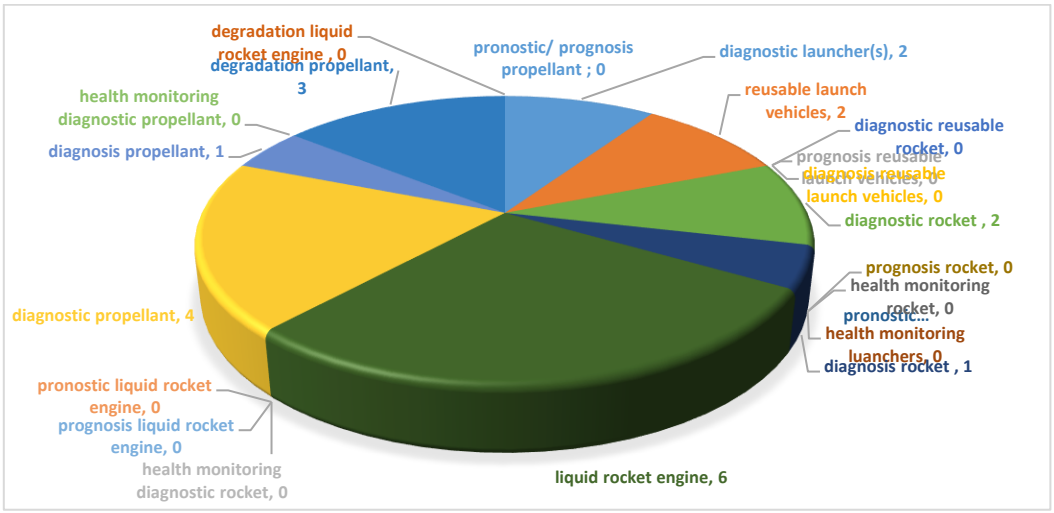

Figure 7 : Nombre d'articles de chaque combinaison de mot clé Taylor & Francis Online

Les combinaisons « reusable launch vehicules » et « liquide rocket engine » représentent le plus grand nombre d'articles trouvés. Les recherches en utilisant les combinaisons « prognostic », «prognosis », « pronostic » ne donnent quasiment aucun résultat. Cela peut être expliqué par la rareté des recherches de pronostic sur la thématique de stage.

Finalement, pour rassembler les différents articles intéressants pour notre sujet, nous avons créé une base bibliographique sur Zotero. Cette base a été remplie sur les différentes étapes du stage.

L'objectif de créer une telle base est la facilité de partage des références bibliographiques avec les personnes impliquées, ainsi que la facilité de trouver les articles selon les mots clés et la thématique de chaque article.

Parmi les articles intéressants trouvés pendant cette étape :

- [1]: Les travaux présentés dans cet article tentent de résoudre ce problème en proposant une méthode basée sur un modèle de dégradation. Un observateur, basé sur un filtre de Kalman étendu, estime l'état de santé et la dynamique des dégradations. Ce résultat est extrapolé jusqu'à ce qu'un seuil soit atteint et la durée de vie résiduelle en est déduite. Cette méthode permet d'estimer la durée de vie avec un modèle unique, robuste aux incertitudes, quelles que soient les conditions de fonctionnement.
- [2] **:** Cet article traite des problèmes commerciaux qui doivent être pris en compte lors du choix d'une approche de modélisation appropriée pour l'essai. Il présente également des tableaux de classification et des diagrammes de flux de processus pour aider l'industrie et le personnel de recherche à sélectionner des modèles de pronostic appropriés pour prédire la durée de vie utile restante des actifs d'ingénierie dans leur environnement commercial spécifique. L'article explore ensuite les forces et les faiblesses des principales classes de modèles de pronostics pour établir ce qui les rend mieux adaptées à certaines applications qu'à d'autres et résume comment chacune a été appliquée aux pronostics d'ingénierie. Par conséquent, cet article devrait fournir un point de départ aux jeunes chercheurs qui envisagent d'abord des options pour conserver la prévision de la durée de vie utile restante. Les modèles décrits dans cet article sont basés sur la connaissance (experts et flous), l'espérance de vie (stochastique et statistique), les réseaux de neurones artificiels et les modèles physiques.
- [3] **:** Les travaux de cet article proposent une approche pour la détection et le diagnostic des défauts est l'évaluation quantitative basée sur un modèle qui prend en compte les interactions au niveau du système dans le système cible. Dans cette approche, la modélisation et la simulation au niveau du système multi-physique pour un système cible sont effectuées à l'aide de Modelica. L'un des avantages de l'approche de surveillance de l'état basée sur un modèle est que les défauts et les modes de défaillance sont attribués à des informations physiquement significatives, ce qui est inestimable pour le responsable de la maintenance.

V - Traitement des données :

Pour pouvoir développer des méthodologies d'estimation de la durée de vie résiduelle d'un composant d'un moteur fusé à ergols liquides, des simulations ont été générées à partir du simulateur CARINS de la part du CNES.

Le cas d'étude choisi est une fissuration de la paroi interne (liner) de la chambre de combustion amenant à une fuite d'ergol froid depuis le circuit régénératif directement dans la chambre de combustion.

Le logiciel CARINS permet de simuler cette dégradation et de voir les impacts d'un tel fonctionnement dégradé au niveau des performances moteur (rendement de combustion, poussée…) en boucle ouverte et en boucle fermée.

I. Description du moteur :

Le moteur choisi comme cas d'application pratique des méthodes d'estimation de la RUL de la chambre de combustion est un moteur fictif en LOX-LH2 de 10 kN de Poussée avec une alimentation des ergols en chambre via deux électropompes.

La chambre présente un circuit régénératif en hydrogène et un divergent permettant de délivrer la poussée requise de 10 kN.

Dans les lignes d'alimentation des ergols on trouve les deux vannes d'isolement VCO et VCH qui permettent d'admettre les ergols en chambre (vannes tout ou rien).

Le moteur dispose d'une plage de fonctionnement de poussée entre 50 et 110% de la poussée nominale et d'une boucle d'asservissement en pression et rapport de mélange chambre, en utilisant comme commandes d'entrée les puissances délivrées aux moteurs électriques des électropompes.

La boucle de commande est réalisée en continue (analogique) via un simple PID multi variable. Il sera possible, dans la suite des travaux, de passer sur une étude plus fine du système de régulation en explorant des méthodes plus performantes et en prenant en compte un environnement plus proche de la réalité (commande numérique, anti wind-up, zone mortes, etc…).

Ci-dessous le synoptique du cycle moteur avec ses composants principaux :

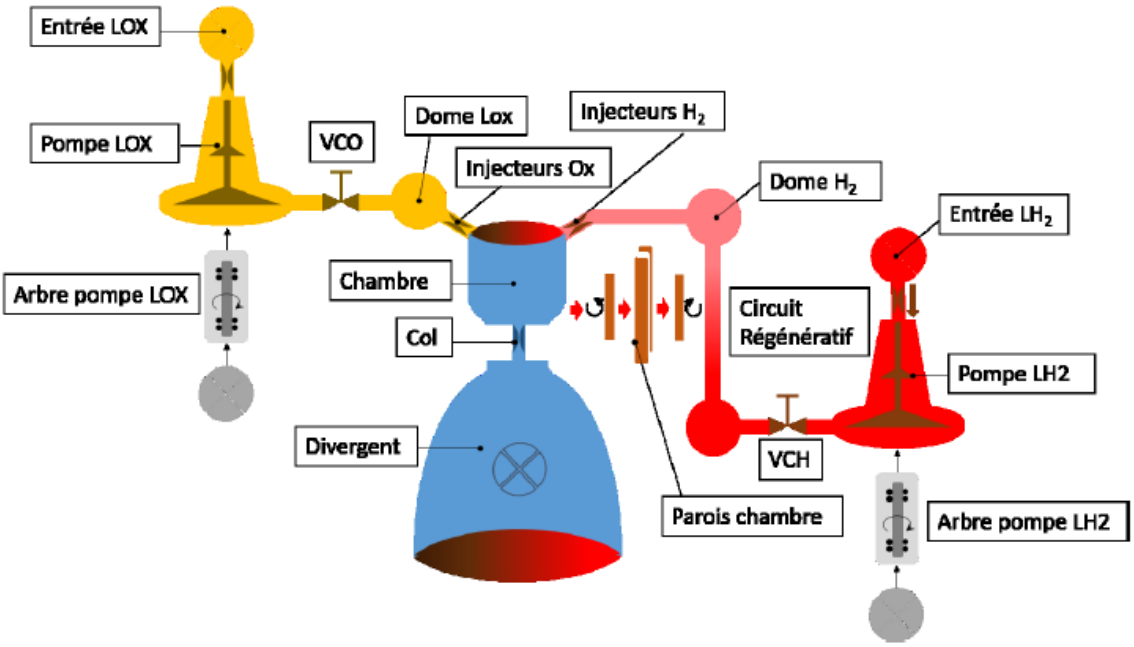

Figure 8 : Synoptique moteur

I.1 Performances du moteur :

Dans le tableau ci-dessous les performances principales du moteur sont listées sur les deux points nominaux à 10 kN (point A) et 6 kN (point L).

	100%	60%
Poussée [kN]	10	6
Débit [kg/s]	2,3	1,4
ISP [s]	440	437
Pression foyer [bar]	28,6	17,2
Rapport de mélange [-]	6,9	6,9
Puissance pompe LOX [kW]	13,23	4
Puissance pompe LH2 [kW]	36,44	12,89

Tableau 2 : Performances moteur

Pour pouvoir disposer d'un premier jeu de données, nous avons reçu les données de 10 moteurs dont 4 de qualification et 6 de production (5 utilisés en vol et 1 utilisé en sol en tant que soutien à la production). Ce nombre sera ensuite augmenté pour simuler la montée en production et l'augmentation de données à disposition au fur et mesure des utilisations. Nous appellerons dans la suite ces moteurs QM1…4 pour le moteur de qualification, FM1…5 pour les moteurs de production (vol) et PM1 pour le moteur de production (sol).

I.2 Description et modélisation de la dégradation :

Comme évoqué précédemment le simulateur permet de simuler un défaut de fissuration de la chambre amenant à une perte d'efficacité de combustion et une dégradation globale des performances moteur. Il s'agit d'un phénomène qui a été observé sur la paroi interne du moteur Vulcain 2 à plusieurs reprises pendant les essais de qualification et les essais de soutien à la production.

La fissuration du liner provoque une fuite d'H2 qui circule dans le Circuit Régénératif (CR) dans la chambre de combustion, cet effet est modélisé par :

- Un délestage du débit de CR vers la cavité qui représente la chambre de combustion
- Une soustraction du flux thermique depuis la chambre de combustion pour modéliser la perte énergétique liée à l'inhomogénéité introduite via la présence du film cooling

Le délestage est simulé via l'apparition d'une fuite (perte de charge singulière) avec une surface égale au nombre des fissures fois la surface d'une fissure.

En plus la perte de rendement de combustion est modélisée en soutirant de la chambre, un flux thermique additionnel directement proportionnel au débit de fuite calculé. Comme présenté sur les équations :

$$N_{fissures} = \begin{cases} 0 & si \int_0^t flux(t)dt < K_{lim} \\ K_n(\int_0^t flux(t)dt - K_{lim})^{K_{exp}} & si \int_0^t flux(t)dt > K_{lim} \end{cases}$$

$$S_{fuite} = N_c . S_{fissure}$$

$$S_{fissure} = 0.05mm^2$$

$$flux_{fuite} = K_{flux} . q_{fuite}$$

Les valeurs de l'ensemble des paramètres sont représentées sur le tableau ci-dessous :

Paramètre	Valeur
K_n	1,8e-4 J^{-1}
K_{lim}	3e9 J
K_{exp}	0,6
$S_{fissure}$	0,05 mm^2
K_{flux}	120e06 W/(kg/s)

Tableau 3 : Paramètres réglant la modélisation de la fuite CR/chambre

Les résultats préliminaires de dégradation qui ont été présentés par le CNES sont la perte de charge singulière à travers de CR (figure 9) , et la dégradation de rendement de la vitesse caractéristique (figure 10).

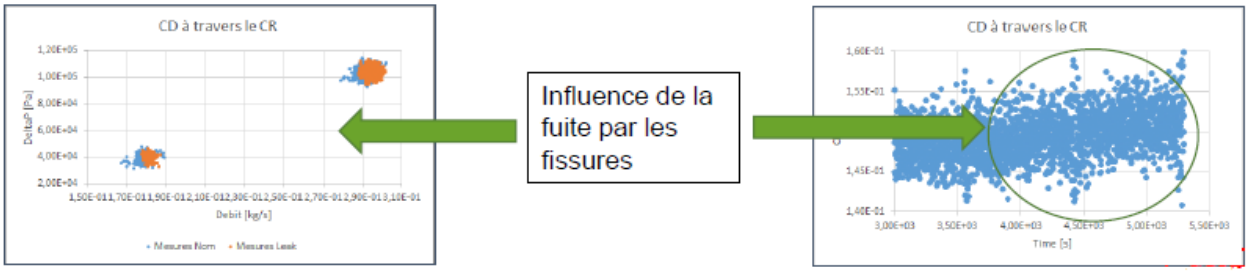

Figure 9 : Perte de la charge singulière à travers le CR

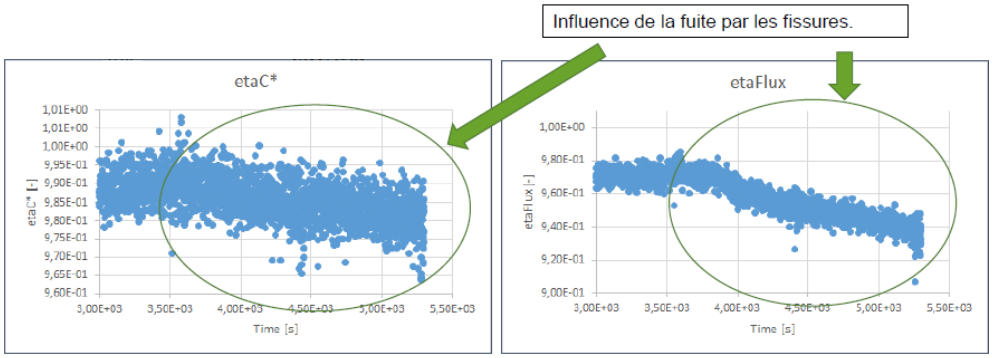

Figure 10 : Dégradation du rendement de la vitesse caractéristique

Nous avons fait l'hypothèse que le rendement de la vitesse caractéristique est le candidat le plus convenable pour le rôle d'indicateur de santé, car sa dégradation est plus importante et considérable par rapport à la perte de charge singulière.

Les calculs de la vitesse caractéristique et son rendement associé se font par les équations suivantes :

$$C^* = \frac{p_{cc}.S_{col}}{q_{tot}}$$

$$\eta C^* = \frac{C^*_{réelle}}{C^*_{theorique}}$$

Avec :

S_{col} est la section au col, p_{cc} est la pression de la chambre de combustion, et q_{tot} représente le débit total (débit d'hydrogène plus le débit d'oxygène).

Nous pouvons calculer etaC* par deux méthodes différentes, soit en utilisant les mesures des variables (p_{cc}, q_{tot}) issues directement des capteurs de la simulation (etaC*$_{mesuré}$), soit en utilisant les valeurs réelles des grandeurs (etaC*$_{calculé}$).

Nous avons tracé sur les figures 11 et 12, l'évolution de ces rendements en fonction du temps.

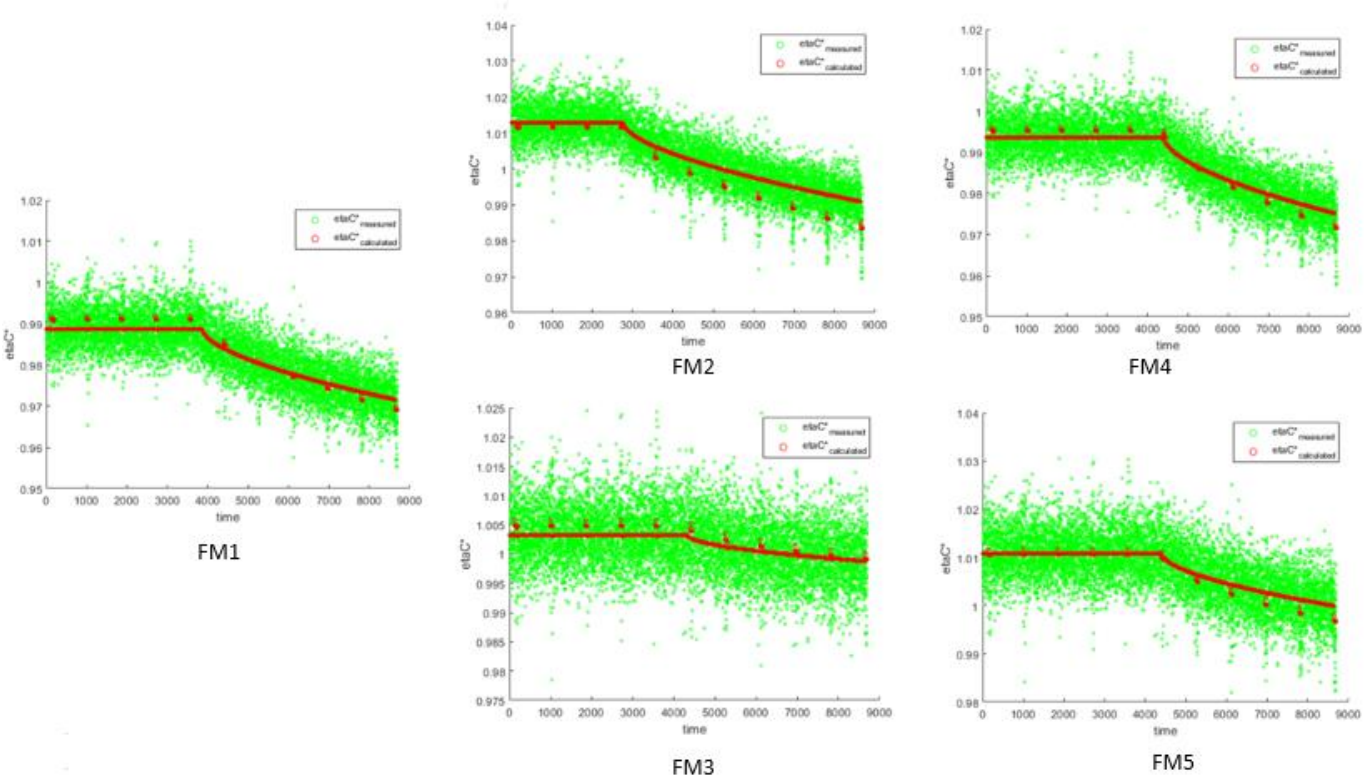

Figure 11 : Dégradation etaC calculé et mesuré pour les moteurs FM*

Nous remarquons clairement qu'après l'apparition des fissures les rendement etaC* diminuent selon le profil de chaque moteur FM. La différence entre la courbe de etaC*$_{mesuré}$ et etaC*$_{calculé}$ est expliqué par l'ajout de bruit blanc additif aux valeurs des mesures de la simulation sur le rendement etaC*$_{mesuré}$.

Les points qui sont au-dessus et au-dessous des courbes sont dus aux changements de points de fonctionnement.

De la même manière, nous remarquons sur la figure 12 que les rendements de etaC* se dégradent après l'apparition des fissures pour les moteurs. La dégradation est moins stable sur les moteurs de qualification puisque leurs profils de fonctionnement sont différents par rapport aux moteurs de production (FM), ils utilisent quasiment tous les points de fonctionnement possibles pour tester leurs performances dans des conditions extrêmes.

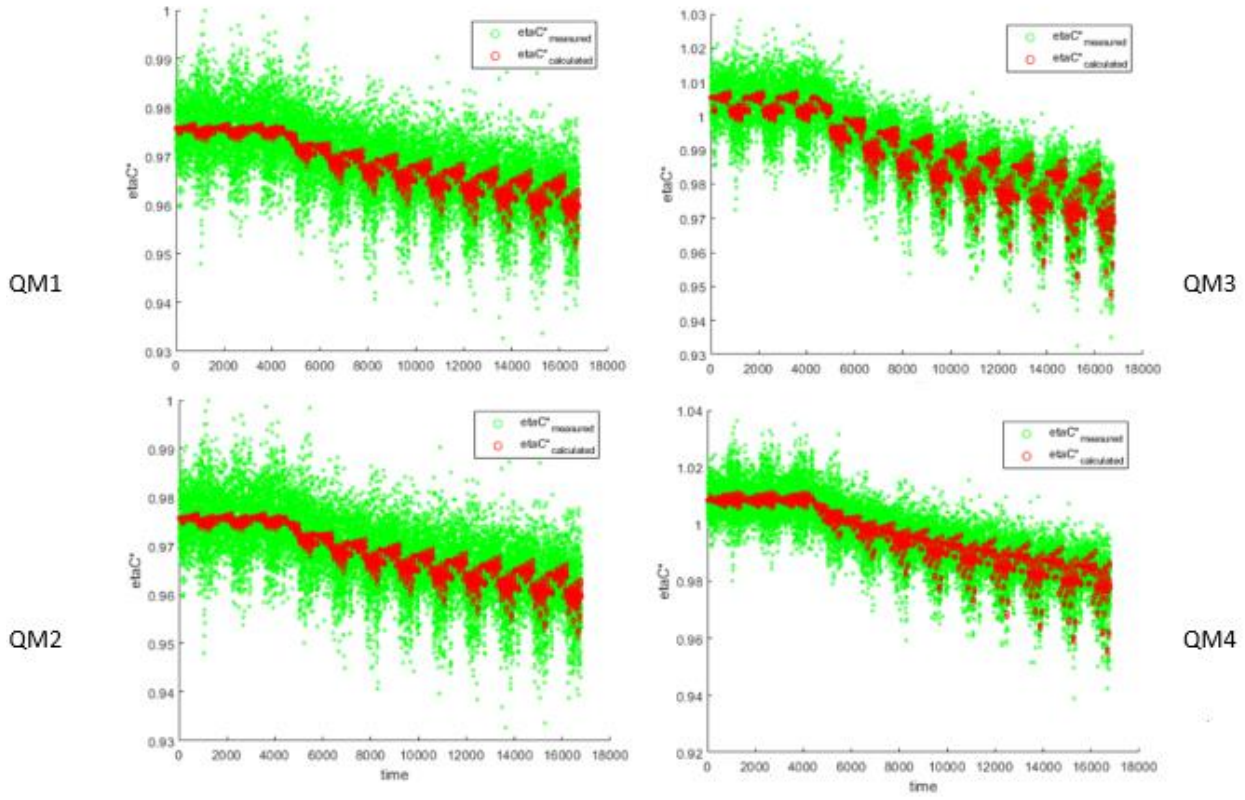

Figure 12 : Dégradation etaC calculé et mesuré pour les moteurs QM*

VI - Estimations du Filtre de Kalman Etendu (EKF)

Après les échanges avec le CNES et les recommandations de mes tuteurs, nous avons choisi d'utiliser les Filtres de Kalman Etendu comme méthode d'estimation de la dégradation de l'indicateur de santé etaC*. Premièrement, nous allons présenter le fonctionnement de ces filtres et la manière avec laquelle nous les avions appliqués aux données de simulation de l'ensemble des moteurs

I. Fonctionnement des Filtres de Kalman Etendu :

Le point de départ de l'estimation d'EKF d'après [4] ; [5] ;et [6] est une équation de transition d'états discrète qui décrit l'évolution d'un vecteur d'état en fonction du temps. Ceci est couplé à une équation d'observation qui décrit comment les observations d'état sont faites. Nous choisissons de dériver l'algorithme de filtre de Kalman en termes d'estimateur linéaire récursif, c'est-à-dire que nous faisons l'hypothèse que la solution pour l'estimateur est linéaire et nous trouverons par la suite les gains qui

minimisent l'erreur moyenne quadratique. L'algorithme de filtre de Kalman résultant calcule d'une manière récursive les estimations de l'état sur la base d'une combinaison linéaire des estimations précédentes et des nouvelles observations qui ont été faites. La dérivation en termes d'estimateur linéaire expose la simplicité essentielle du filtre de Kalman comme une simple somme pondérée d'observation et d'estimations.

Nous supposons que le système qui nous intéresse est décrit par une équation d'état non-linéaire à temps discret :

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + v_k$$

$$y_k = h(x_k, u_k) + w_k$$

Où x_k et y_k représentent, respectivement, le vecteur d'état et le vecteur d'observation. f et h sont les fonctions non-linéaire de transition d'état et d'observation. v_k et w_k sont les bruits blanc additifs associés.

Le fonctionnement d'EKF commence par une estimation de l'état à un instant $k-1$ basée sur les observations y_{k-1} faites jusqu'à cet instant, ensuite, l'algorithme fonctionne selon deux étapes :

- **Prédiction :** de l'état et de la variance à l'instant k

$$\hat{x}(k|k-1) = f\big(\hat{x}(k-1|k-1), u(k)\big)$$

$$P(k|k-1) = \nabla f_x(k) P(k-1|k-1) \nabla f_x(k)^T + Q(k)$$

Où P est la variance, $\nabla f_x(k)$ est le jacobien de la fonction f par rapport à x

- **Mise à jour (ou Correction) :** la mise à jour de l'état et de la variance à l'instant k se base sur l'état et la variance prédites et la nouvelle observation $y(k)$ selon les équations suivantes

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + W(k)\big[z(k) - h\big(\hat{x}(k|k-1)\big)\big]$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - W(k)S(k)W(k)^T$$

La matrice de gain : $W(k) = P(k|k-1)\nabla h_x^T(k) S^{-1}(k)$

La covariance de l'innovation : $S(k) = \nabla h_x(k) P(k|k-1) \nabla h_x^T(k) + R(k)$

$\nabla h_x(k)$: Le Jacobien de la fonction non-linéaire h par rapport à x.

II. Application des filtres de Kalman Etendu aux données du CNES :

Nous faisons l'hypothèse que la dégradation de $etaC^*_{calculé}$ se fait selon une fonction exponentielle sous la forme suivante :

$$f(t) = e^{\alpha t} + f_0$$

Où α est le taux de dégradation de la fonction exponentielle et f_0 la valeur initiale de f

L'équation d'état, après discrétisation, devienne :

$$f(k+1) = \big(1 + Ts.\alpha(k)\big) f(k) - f_0.Ts.\alpha(k)$$

Avec : $\alpha(k+1) = \alpha(k)$ (dynamique à évolution lente), Ts est la période d'échantillonnage.

Les équations d'état augmenté sont présentées comme suit :

$$\begin{pmatrix} f(k+1) \\ \alpha(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+\alpha(k).Ts & -f_0.Ts \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \begin{pmatrix} f(k) \\ \alpha(k) \end{pmatrix}^T + \begin{pmatrix} w_f \\ w_\alpha \end{pmatrix}^T$$

Où w_f, et w_α représentent les bruits blanc additifs d'état associés à la fonction f et du paramètre α

Le vecteur d'état, à l'instant k, est construit de la fonction f et du paramètre α à l'instant k :

$$x(k) = \begin{pmatrix} f(k+1) \\ \alpha(k+1) \end{pmatrix}$$

Le jacobien de f par rapport à x : $\nabla f_x(k) = \begin{pmatrix} 1+\alpha(k).Ts & Ts.f(k) - f_0.Ts \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

La variance : $$P(k+1) = \nabla A(k)P(k)\nabla A(k)^T + Q(k)$$

Le vecteur d'observation est exprimé selon l'équation :

$$z(k) = etaC^*_{calculée}(k) + v(k)$$

Où v est le bruit blanc additif des observations

Les matrices de covariance d'état et d'observations sont construites de la manière suivante :

$$R = \sigma_r^2 \ ; Q = \begin{pmatrix} \sigma_f^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\alpha^2 \end{pmatrix}$$

Avec les bruits associés $w_f \sim N(0, \sigma_f)$; $w_\alpha \sim N(0, \sigma_\alpha)$; $v \sim N(0, \sigma_r)$

En pratique, l'initialisation des matrices de covariances Q et R est difficile à obtenir [7]. Pour cela, nous avons appliqué la méthode des moindres carrés avant les estimations d'EKF afin d'initialiser Q et R d'une manière appropriée.

$$\begin{cases} \sigma_f = 1{,}5.10^{-7} \\ \sigma_\alpha = 2.10^{-7} \\ \sigma_r = 0{,}001 \end{cases}$$
$$P_0 = 10.Q$$

Ci-dessous les résultats des estimations pour les moteurs FM & QM :

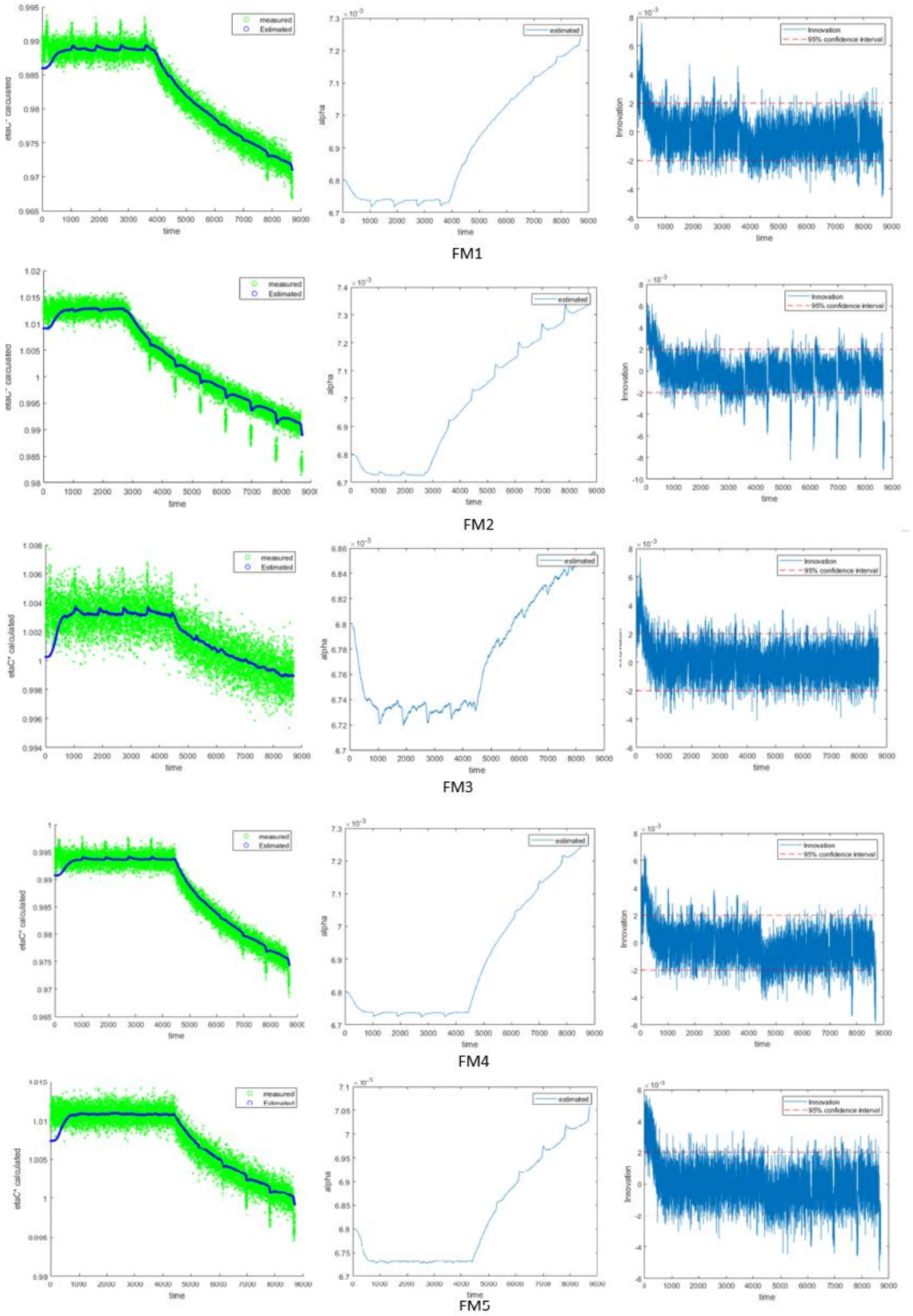

Figure 13 : Résultats des estimations EKF de etaC pour les moteurs FM*

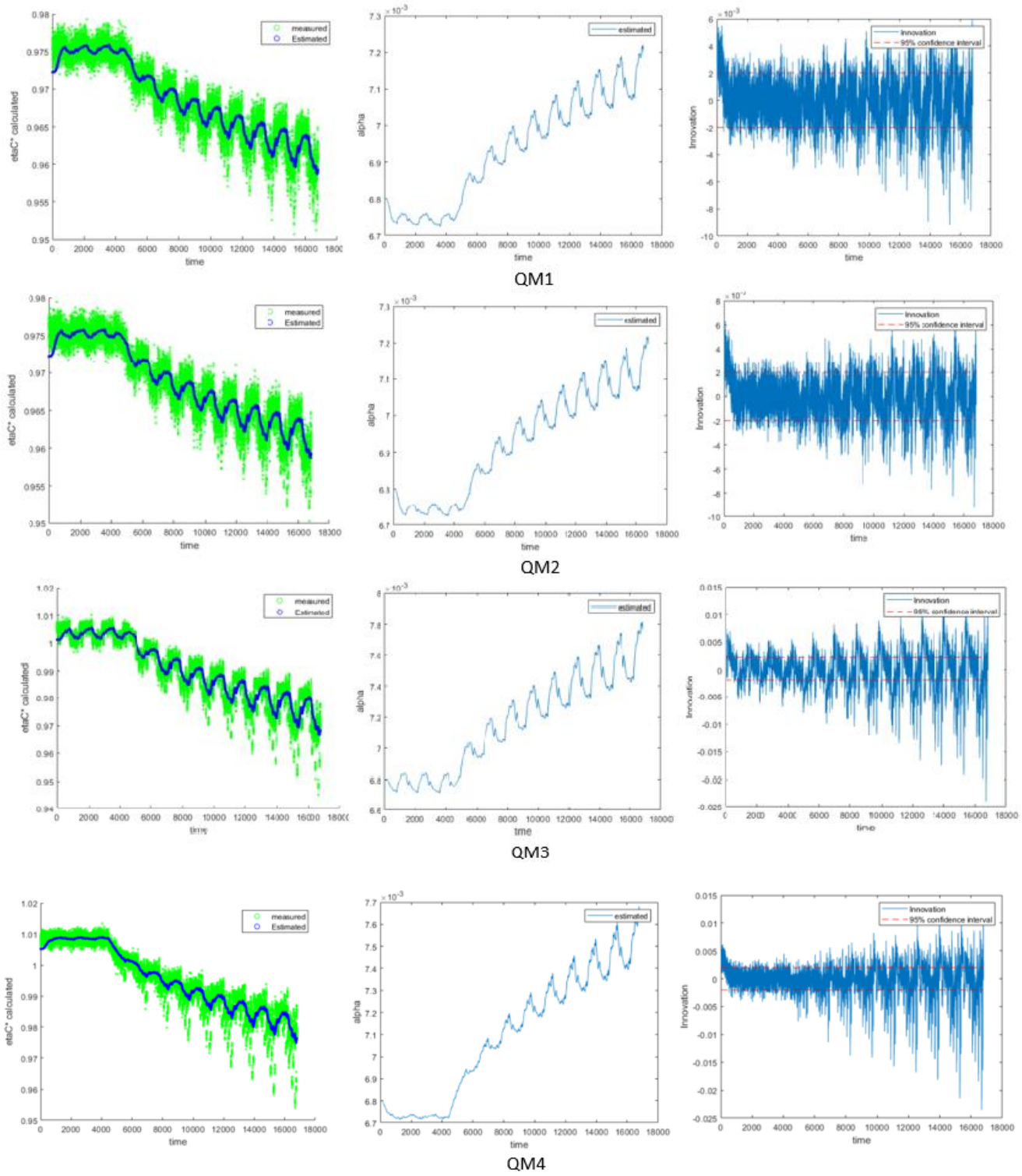

Figure 14 : : Résultats des estimations EKF de etaC pour les moteurs QM*

Discussion des Résultats FM : nous remarquons sur les résultats des estimations etaC* de la figure 13, que l'algorithme EKF est capable d'estimer la dégradation de l'indicateur de santé (les courbes à droite), nous pouvons remarquer également que l'étape de mise à jour ou de correction de l'EKF permet à l'algorithme de converger vers les bonnes valeurs de etaC* après 1000s. Les courbes au milieu montent l'évolution des estimations d'alpha pour chaque moteur FM, nous observons que ces évolutions changent directement après l'apparition des fissures. L'importance des estimations d'alpha est de fournir une information sur l'instant d'apparition des fissures, et peuvent jouer le rôle d'indicateur dans le cas réel où cet instant est inconnu. Les courbes à droite représentent l'évolution de l'innovation en fonction du temps avec les bornes de son intervalle de confiance à 95%, nous rappelons que l'innovation est l'erreur ou la différence entre les estimations de $etaC^*_{calculé}$ fournies par EKF et les observations issues des capteurs. Cette notion d'innovation permet d'avoir une idée sur les performances du filtre et ses estimations. Nous observons que les évolutions de l'innovation pour les moteurs FM1, FM2, FM4, et FM5 ne dépassent pas les bornes de l'intervalle de confiance, concernant le moteur FM3, l'innovation dépasse légèrement les bornes de l'intervalle de confiance aux instants de changements de point de fonctionnement, cela est dû au profil d'essai du moteur plus les variables dispersées sur la simulation pour crées les fuites.

Discussion des Résultats QM : la première remarque que nous pouvons déduire sur la figure 13, est l'instabilité de la dégradation de etaC* ainsi que ses estimations associées pour l'ensemble des moteurs QM par rapport aux moteurs FM. Cela expliqué précédemment par le chemin de points de fonctionnement suivi par les moteurs de qualification (la même remarque est faite pour les courbes des données vierges de $etaC^*_{calculé}$ pour les moteurs QM). Deuxièmement, les évolutions du paramètre alpha changent après l'apparition des fissures, et comme pour les moteurs FM, cela peut être un indicateur sur l'avènement des fuites dans le cas réel. Finalement, pour les courbes d'innovation, nous observons des dépassements des bornes de l'intervalle de confiance surtout après l'apparition des fissures, cela est expliqué par le profil d'essai particulier des moteurs de qualification.

III. Génération de la Durée de Vie Résiduelle (RUL) :

La durée de vie résiduelle (RUL) est définie comme la différence de temps entre un instant de prédiction t_{pred} et l'instant de défaillance t_{fail} (voir figure 14) associé un seuil qu'à partir duquel le système est considéré en panne et ne peut plus réussir sa mission.

$$RUL(t_{pred}) = t_{failure} - t_{pred}$$

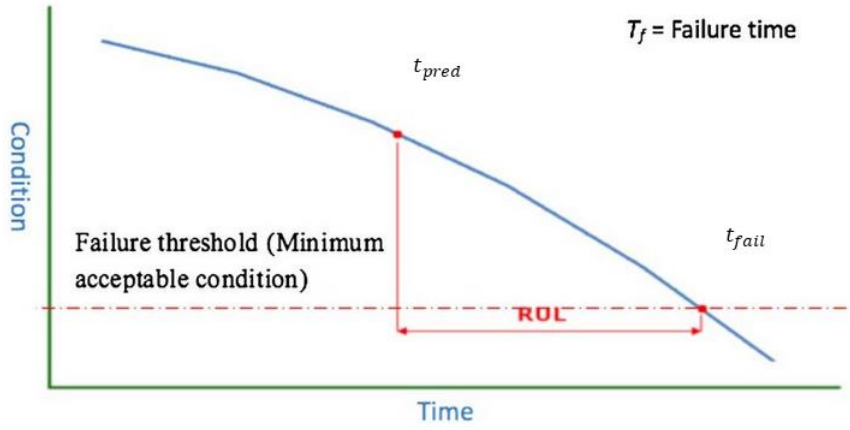

Figure 15 : Illustration de la Durée de Vie Résiduelle

Premièrement, nous avons prédéterminé un seuil de défaillance pour chaque moteur en faisant l'hypothèse qu'à partir de ce dernier le système est considéré en panne. Ensuite, l'algorithme pour générer les RULs de l'ensemble des données de simulation récupère les valeurs des estimations de $\hat{f}$ et $\hat{\alpha}$. Tant que l'estimation de etaC* est supérieure au seuil prédéterminé, nous nous projetons au futur selon deux conditions essentielles. La première illustre le fait que la RUL dans aucun cas ne dépassera la différence entre l'instant de franchissement du seuil et l'instant de prédiction selon l'équation :

$$p < t_{fail} - t_{fissures},$$

La deuxième représente la projection dans le futur selon la fonction exponentielle suivant l'équation suivante :

$$\hat{f}(k+p) = \left(1 + T_s.\hat{\alpha}(k)\right)\hat{f}(k+p-1) - f_0.T_s.\hat{\alpha}(k)$$

L'algorithme est détaillé sur la figure ci-dessous :

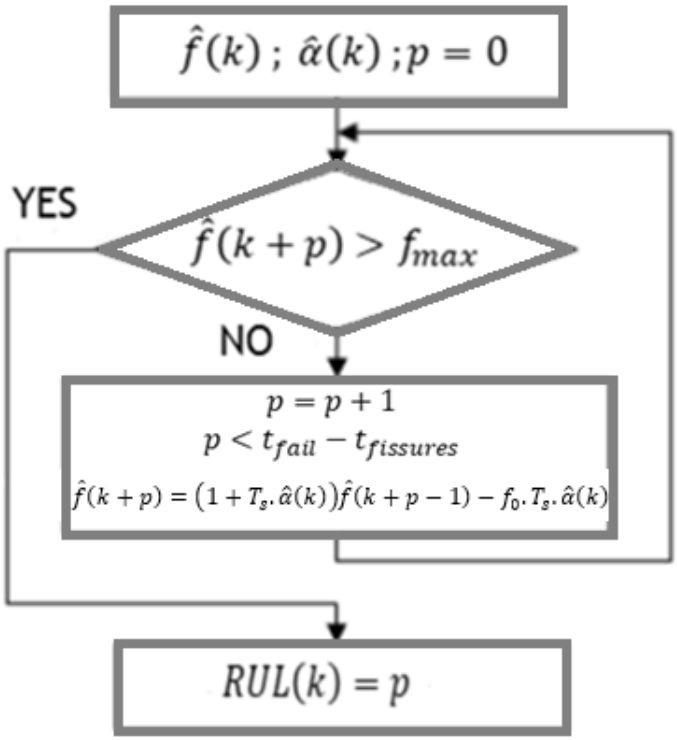

Figure 16 : Algorithme de la RUL

Les RULs générées seront tracées et comparées avec des RUL théoriques (RUL_{real}) avec ses bornes +/- 10% afin d'avoir une idée sur la robustesse des prédictions de l'algorithme [7].

Les seuils prédéterminés pour chaque moteur sont représentés sur la figure ci-dessous :

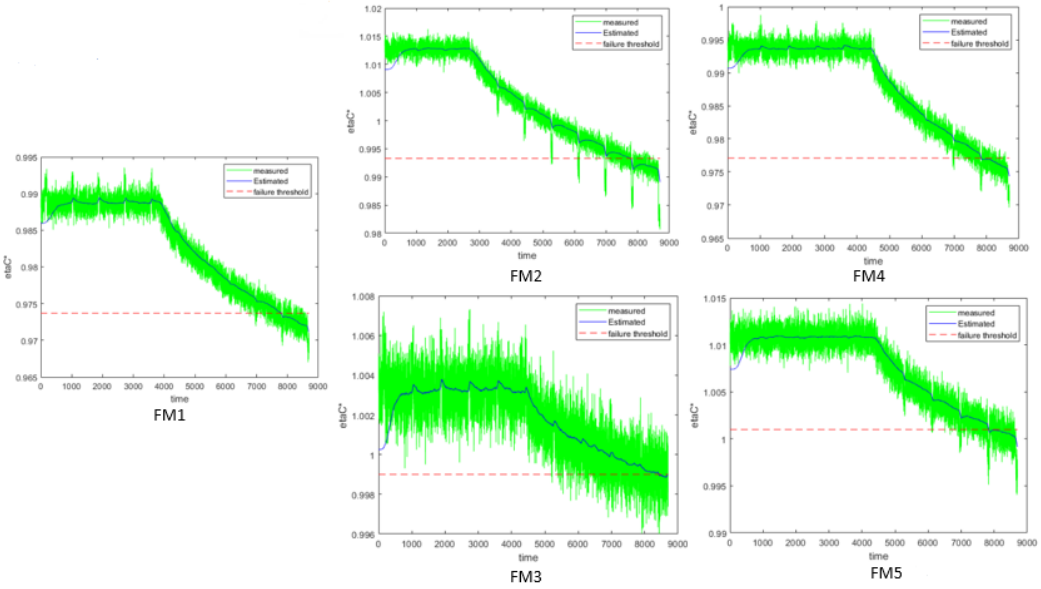

Figure 17 : Seuils prédéterminés pour chaque moteur FM

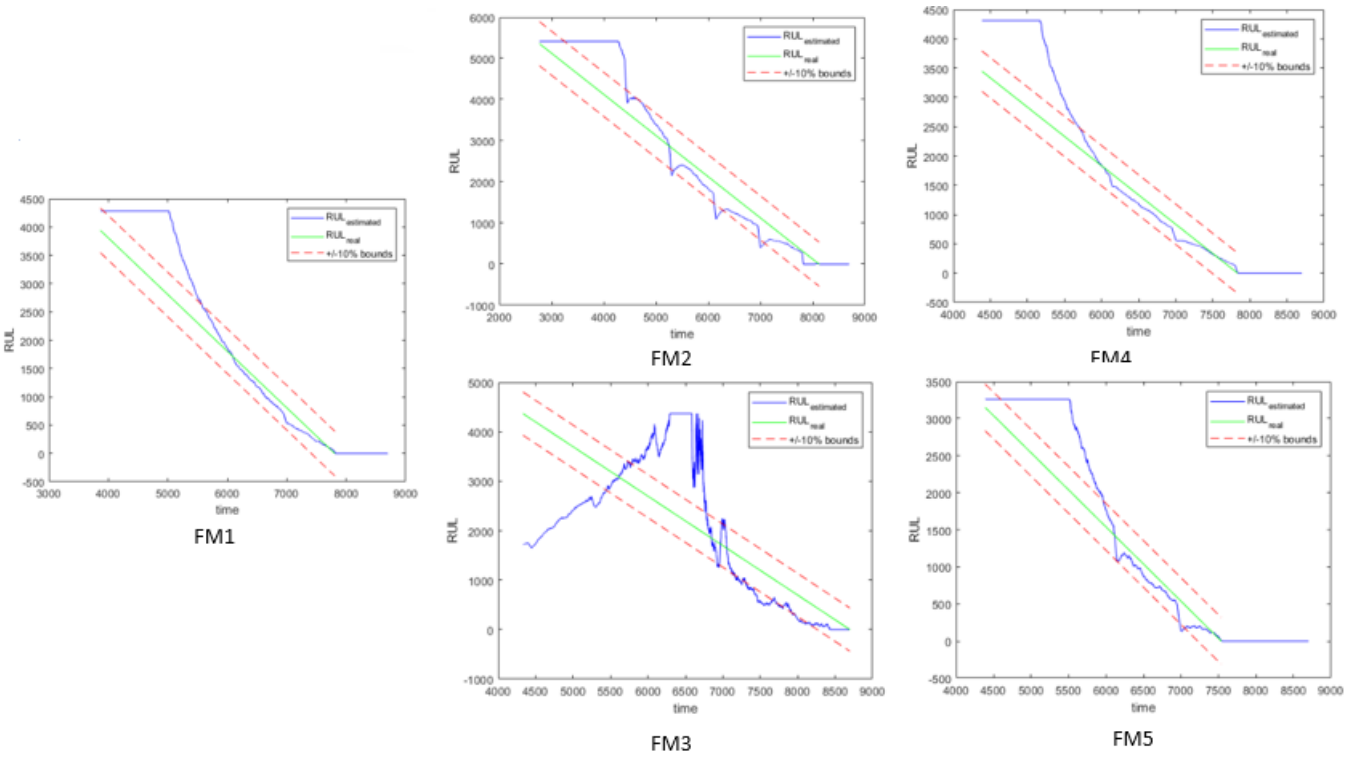

Figure 18 : Résultats de la RUL pour les moteurs FM

Discussion résultats RUL (moteurs FM) : La remarque globale que nous pouvons déduire des résultats de la RUL pour l'ensemble des moteurs FM est la surestimation sur les premiers 1000s, cela est expliqué par le temps que l'algorithme prend pour converger vers les courbes de la RUL théorique (nous rappelons que la RUL théorique ou RUL_{real} présentée sur la figure 18 est, tout simplement, la différence de temps entre l'instant de prédiction et l'instant de franchissement du seuil). Nous avons tracé également l'intervalle +/- 10% de la RUL théorique pour voir la qualité et l'efficacité des prédictions, nous observons, sauf pour le moteur FM3, que les prédictions de la RUL après les

premières 1000s convergent et restent à l'intérieur de l'intervalle +/- 10%. Concernant la RUL du moteur FM3, le résultat obtenu est expliqué par la faiblesse de dégradation de ce dernier plus les bruits blancs ajoutés sur les estimations d'EKF. Nous rappelons que les résultats présentés sur la figure 18 sont générés sans tenir compte aux entrées, c'est-à-dire nous nous projetons au futur en mode 'aveugle' sans tenir compte aux conditions opérationnelles. Cela sera l'objet de la dernière partie (section VII).

De la même manière que pour les moteurs FM, nous avons fixé un seuil de défaillance pour chaque moteur QM qu'à partir duquel, le système est supposé défaillant et incapable de réussir sa mission. La figure ci-dessous montre les différents seuils choisis :

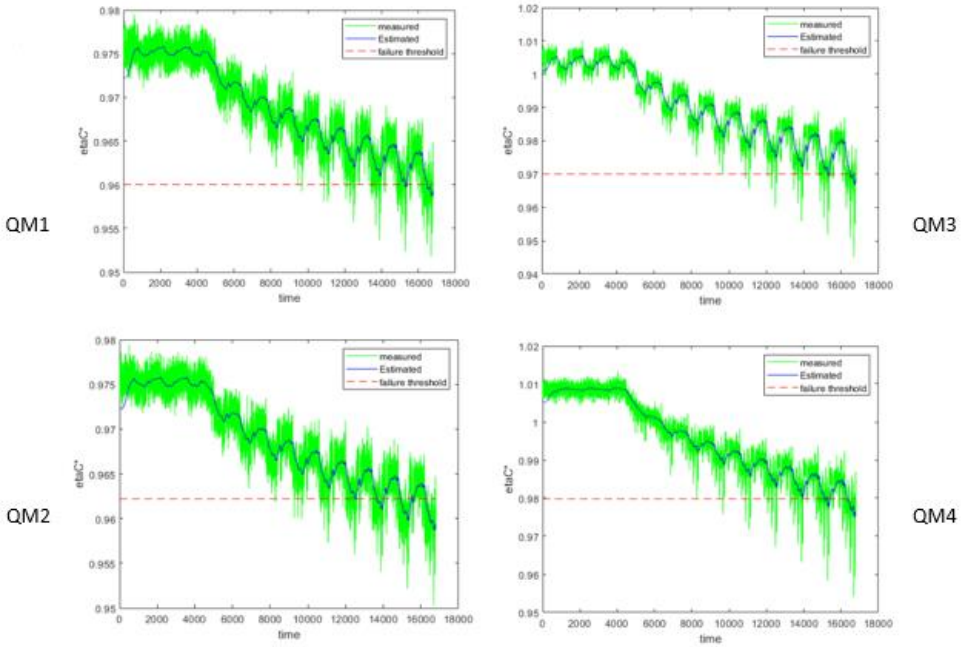

Figure 19 : Seuils de défaillance choisis pour les moteurs QM

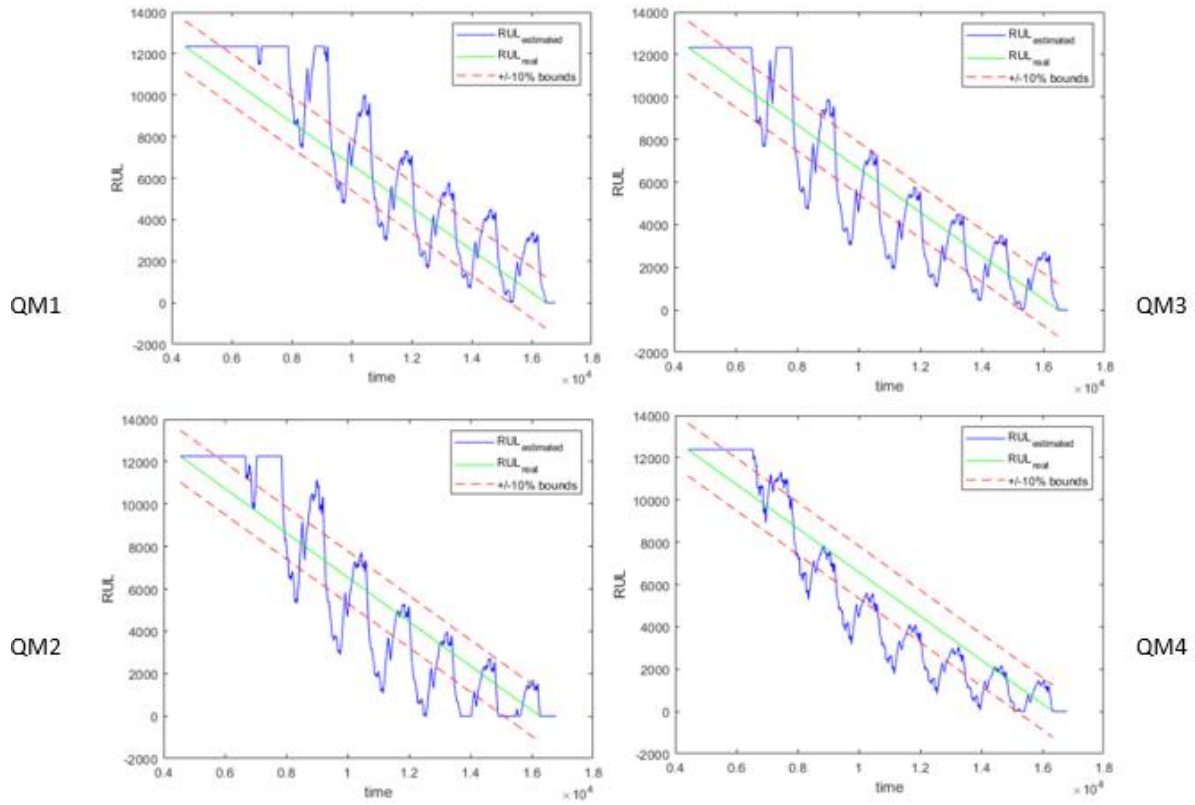

Figure 20 : Résultats de la RUL pour les moteurs QM

Discussion résultat RUL (moteurs QM) : les résultats de la figure 20, montrent les prédictions des RULs pour chaque moteur QM, ainsi que leurs RULs théoriques associées avec l'intervalle de +/- 10%. Nous remarquons des surestimations vers les premières 800s, puis les RULs oscillent autour de courbes des RULs théoriques. Ces oscillations viennent du fait que la dégradation des moteurs QM est instable, car leurs essais dépendent de l'ensemble de points de fonctionnement contrairement aux moteurs FM. Malgré l'instabilité de la dégradation des moteurs de qualification, nous remarquons que les courbes des RULs ne dépassent pas considérablement les bornes de l'intervalle +/- 10%. Ces résultats ne tiennent pas en compte les entrées, cela sera abordé sur la section suivante (section VII).

VII - Intégration des entrées :

L'intégration des entrées dans les estimations du Filtre de Kalman Etendu, ainsi que les prédictions de la RUL est très importante, elle permet de tenir en compte les conditions opérationnelles de chaque moteur et de fournir des prédictions en fonction de l'usage du système et son environnement.

Nous rappelons que les entrées dans notre étude sont définies soit par les puissances des arbres moteurs d'oxygène et d'hydrogène (Pox) et (Pfu), soit par la pression de la chambre de combustion Pcc et le rapport de mélange de l'oxygène et de l'hydrogène (RM). Pour donner suite à cela, nous avons supposé 4 hypothèses pour intégrer les entrées tout en gardant la supposition que la dégradation se fait selon une fonction exponentielle f de paramètre α :

- Hypothèse 1 :

$$\hat{f}_{k+1} = (1 + T_s.\alpha_k)\hat{f}_k - f_0.T_s.\ \widehat{\alpha_k} + \hat{\beta}Pcc_k.T_s$$

- Hypothèse 2 :

$$\hat{f}_{k+1} = (1 + T_s.\alpha_k)\hat{f}_k - f_0.T_s.\widehat{\alpha_k} + \beta 1_k Pox.T_s + \beta 2_k Pfu.T_s$$

- Hypothèse 3 :

$$\hat{f}_{k+1} = (1 + T_s.\alpha_k)\hat{f}_k - f_0.T_s.\ \widehat{\alpha_k} + \widehat{\beta_k}\sum_{i=0}^{k} Pcc_k.T_s$$

- Hypothèse 4 :

$$\hat{f}_{k+1} = (1 + T_s.\alpha_k)\hat{f}_k - f_0.T_s.\widehat{\alpha_k} + \widehat{\beta_{1k}}\sum_{i=0}^{k} Pox_k.T_s + \widehat{\beta_{2k}}\sum_{i=0}^{k} Pfu_k.T_s$$

Pour simplifier les calculs, et à la suite des échanges avec notre responsable au CNES, nous faisons la supposition que les variations du rapport de mélange après l'apparition des fissures sont négligeables. Donc pour les quatre hypothèses nous tiendrons compte qu'à la pression de la chambre de combustion comme entrée.

L'hypothèse 1 consiste à prendre en compte la pression instantanément en la multipliant par la période d'échantillonnage et un paramètre β qui sera à estimer en plus de la fonction exponentielle de la dégradation et son paramètre α. En traçant les valeurs de la Pcc avant et après l'apparitions des fissures, nous avons déduit qu'elles sont de l'ordre de 10^6 alors que les valeurs de etaC* sont comprises entre 0 et 1. La solution que nous avons opté pour rendre Pcc et etaC* de même ordre est de normaliser Pcc de la manière suivante :

$$P_{cc\,normalisé}(k) = \frac{P_{cc}(k) - \min(P_{cc})}{\max(P_{cc}) - \min(P_{cc})}$$

Avec : $\min(P_{cc}) = 0$; et $\max(P_{cc}) = 3{,}34.10^6\mathrm{P}$

L'hypothèse 2 consiste à prendre en compte les pressions des arbres moteurs Pox et Pfu instantanément. Nous rappelons que ces puissances sont des fonctions polynomiales de Pcc comme suit :

$$P_{ox} = a_0 + a_1 P_{cc} + a_2 P_{cc}^2$$

$$P_{fu} = b_0 + b_1 P_{cc} + b_2 P_{cc}^2$$

Où

a_0 = 1,69778864 ; a_1 = -0,2792341 ; a_2 = 0,02389663

b_0 = -1,99217816 ; b_1 = 0,12501836 ; b_2 = 0,0426752

L'hypothèse 3 et 4 consistent à prendre en compte les entrées comme sommation de 0 jusqu'à l'instant de la prédiction. Ces hypothèses permettent de voir l'énergie consommée par l'entrée jusqu'à l'instant de la prédiction.

Afin de respecter les consignes relatives au nombre de pages du rapport, nous allons présenter les résultats d'estimations ainsi que de la RUL des moteurs FM et FM pour les moteurs de vol et QM et QM pour les moteurs de qualification. Le reste des résultats sera présenté sur l'annexe à la fin du document.

I. Résultats des estimations EKF :

En intégrant l'entrée comme présenté à l'hypothèse 1, l'équation d'état devienne :

$$f(k+1) = \big(1 + Ts.\alpha(k)\big)f(k) - f_0.Ts.\alpha(k) + \beta(k).T_s.pcc_{normalisé}(k)$$

Avec l'état augmenté correspondant :

$$\begin{pmatrix} f(k+1) \\ \alpha(k+1) \\ \beta(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+\alpha(k).Ts & -f_0.\,T_s & pcc_{normalisé}(k)Ts \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} f(k) \\ \alpha(k) \\ \beta(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_f \\ w_\alpha \\ w_\beta \end{pmatrix}$$

Où le vecteur d'état à l'instant k : $x(k) = \begin{pmatrix} f(k) \\ \alpha(k) \\ \beta(k) \end{pmatrix}$

Et le Jacobien :

$$\nabla A(k) = \begin{pmatrix} 1+\alpha(k).Ts & f(k).Ts - f_0.\,T_s & T_sPox_{normalisé}(k) & T_sPfu_{normalisé}(k) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

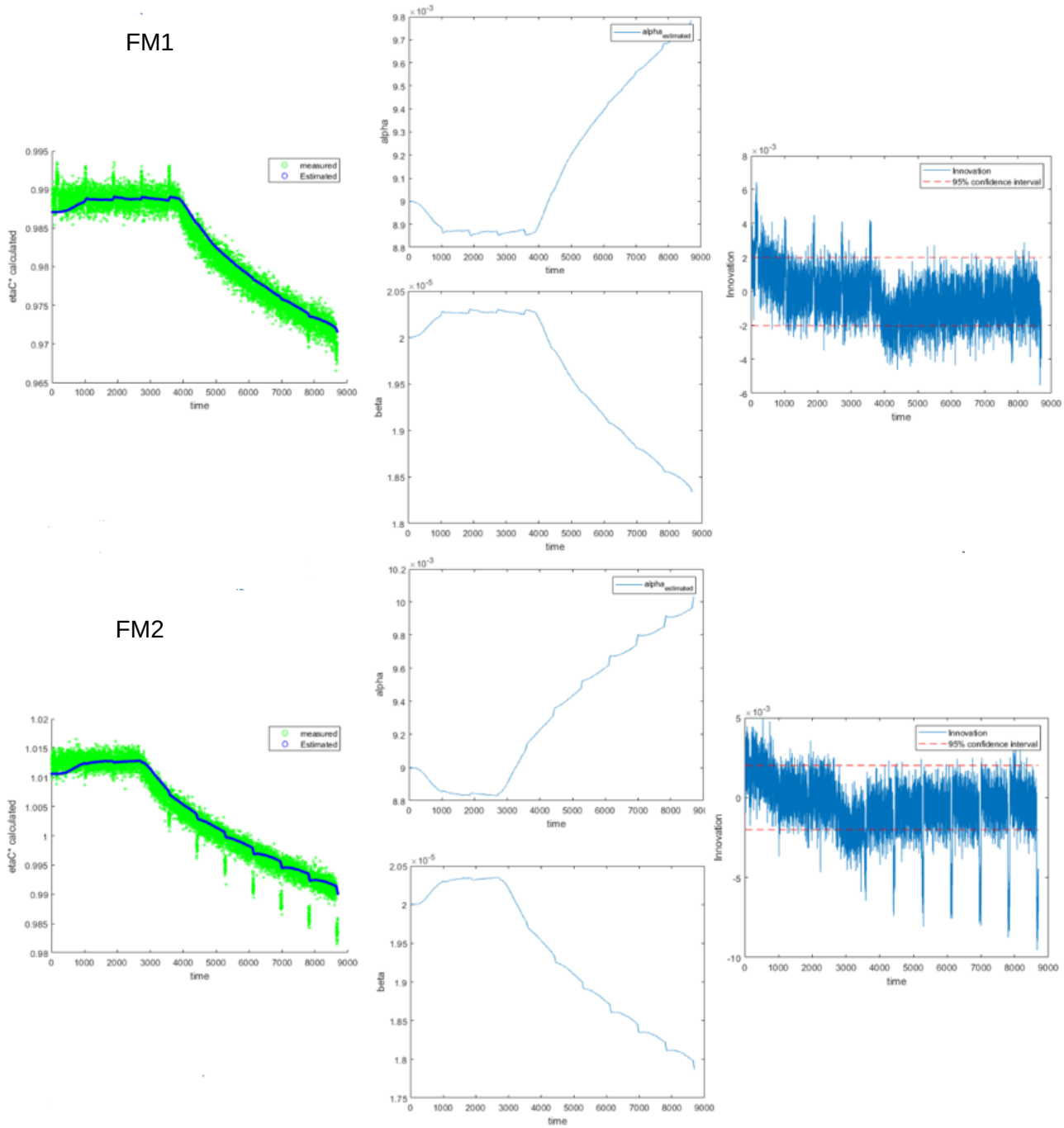

Figure 21 : Résultats des estimations EKF pour les moteurs FM1 et FM2

La figure 21 montre les résultats des estimations de etaC* ,des paramètres α, β, et l'évolution de l'innovation avec son intervalle de confiance à 95%.

Nous pouvons conclure, à partir des courbes de etaC*$_{estimé}$ (courbes à gauche), que les estimations deviennent plus sensibles aux changements des points de fonctionnement (petits piques aux instants 3200s, 4100s, 5000s, 7000s, et 7900s). Les estimations des paramètres α et β (courbes au milieu) fournissent des indications sur les instants d'apparition des fissures en redondance par rapport aux estimations sans tenir compte aux entrées (les estimations de α sans entrée fournissent un seul

indicateur). Les évolutions de l'innovation (courbes à droite) permettent d'avoir une idée sur la performance du filtre. Pour le moteur FM1, l'innovation est bien centrée autour de zéro, et dépassent légèrement l'intervalle de confiance après l'apparition des fissures, ce dépassement est expliqué par le temps que l'EKF nécessite pour converger. Concernant le moteur FM2, l'innovation est contrée autour de zéro, mais aux instants de changements des points de fonctionnement, l'innovation dépasse les bornes de l'intervalle de confiance.

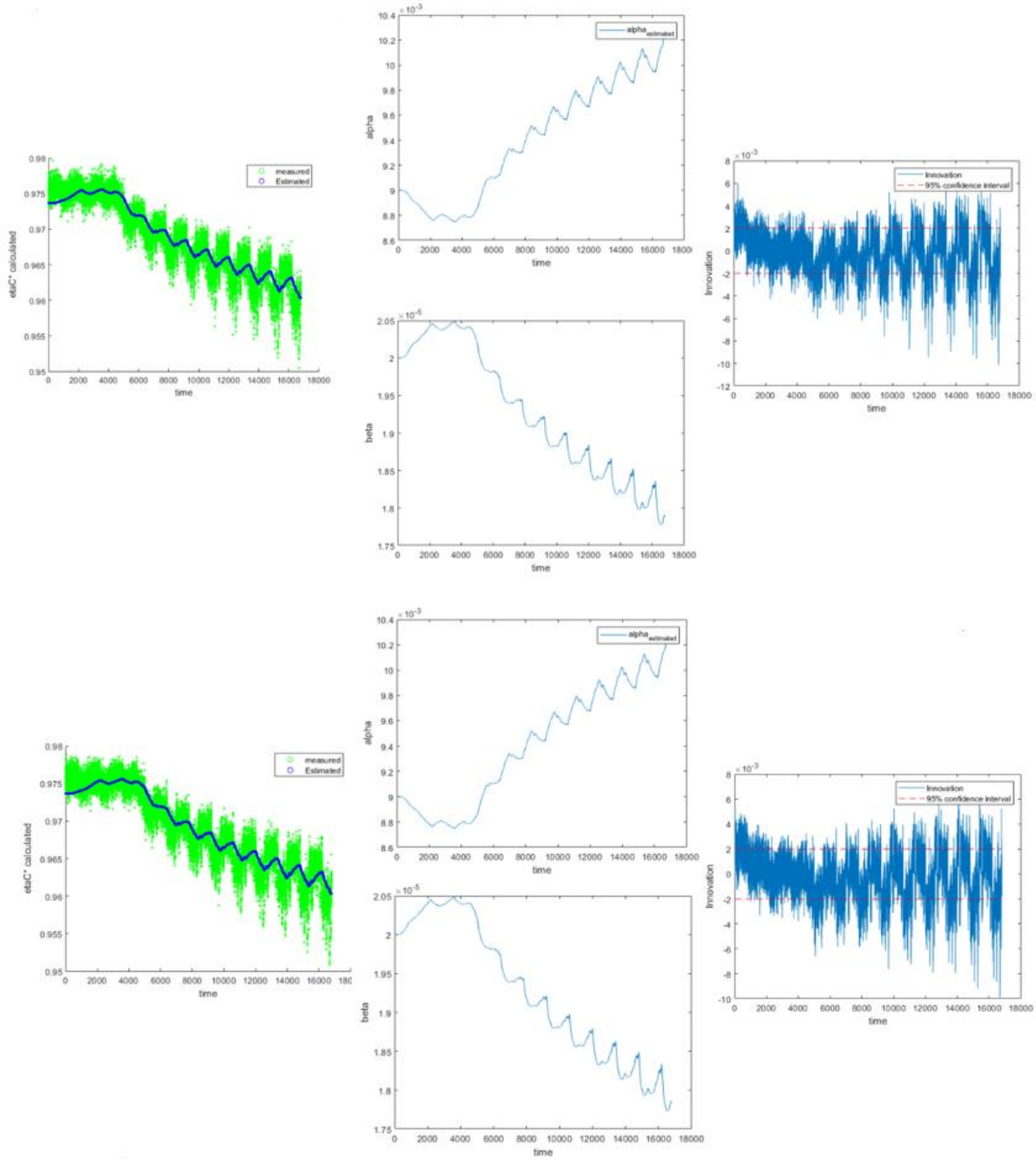

Figure 22 : Résultats des estimations EKF pour les moteurs QM1 et QM2

Les estimations de etaC* sont sensible aux points de fonctionnement puisque. Les évolutions des paramètres alpha et beta changent après l'apparition des fissures, et comme pour les moteurs FM, cela peut être un indicateur sur l'avènement des fuites dans le cas réel. Finalement, pour les courbes d'innovation, nous observons des dépassements des bornes de l'intervalle de confiance surtout après l'apparition des fissures, cela est expliqué par le profil d'essai particulier des moteurs de qualification.

II. Résultats des RULs :

L'algorithme de génération de la RUL en tenant compte des entrées est similaire à celui présenté en section VI-III avec une modification sur l'équation de projection dans le futur :

$$\hat{f}(k+p) = \left(1 + Ts.\hat{\alpha}(k)\right)\hat{f}(k+p-1) - f_0.Ts.\hat{\alpha}(k) + \hat{\beta}(k).Ts.pcc_{normalisé}(k)$$

Tant que les estimations ne franchissent pas le seuil fixé, nous nous projetons au futur et lorsque ce seuil est dépassé, nous récupérons les valeurs des projections à chaque instant.

Les seuils prédéterminés pour les calculs de la RUL en intégrant l'entrée sous forme d'hypothèse 1 sont les mêmes seuils choisis pour la section VI-III, afin de pouvoir comparer les résultats sans et avec entrée.

Les résultats de la RUL pour les moteurs FM1, FM2, QM1, et QM2 sont présentés sur les figures ci-dessous (24 et 25) :

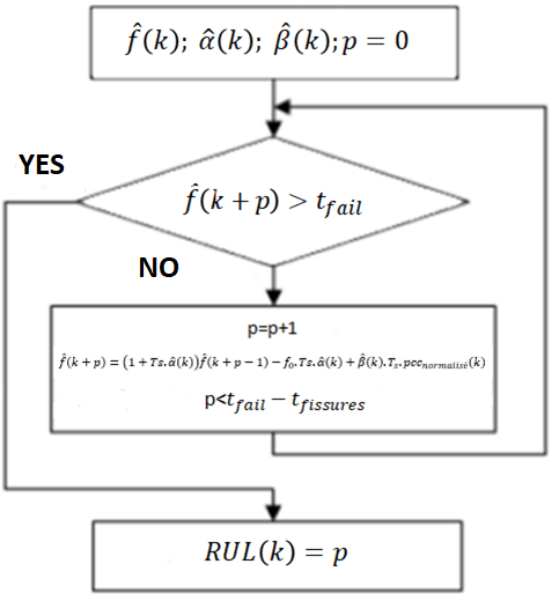

Figure 23 : Algorithme de la RUL avec l'hypothèse 1

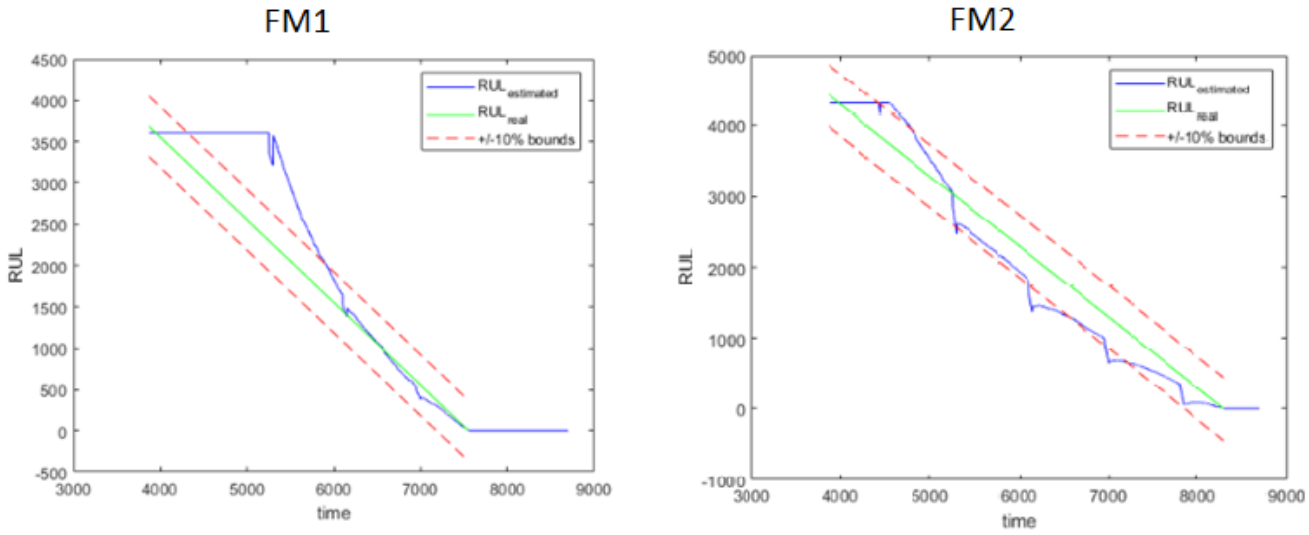

Figure 24 : RUL pour les moteurs FM1 et FM2 avec entrée (hypothèse 1)

Nous remarquons que l'évolution de la RUL dans le temps pour les deux moteurs reste à l'intérieur des bornes de l'intervalle +/- 10%. L'intégration de la pression de la chambre de combustion comme entrée rend les RUL plus sensibles aux points de fonctionnent, nous pouvons observer ces sensibilités clairement aux instants 5300s, 6100s, et 7000s pour le moteur FM1 et aux instants 4300s, 5000s, 6050s, 7000s, et 7900s pour le moteur FM2, les instants mentionnés représentent les instants relatifs

aux changements de point de fonctionnement. Cette influence de l'entrée sur les résultats de la RUL sera plus claire sur les résultats des moteurs de qualification, car, contrairement aux moteurs de vol qui se basent uniquement sur deux points de fonctionnement (point A et L), les moteurs QM utilisent la totalité des points.

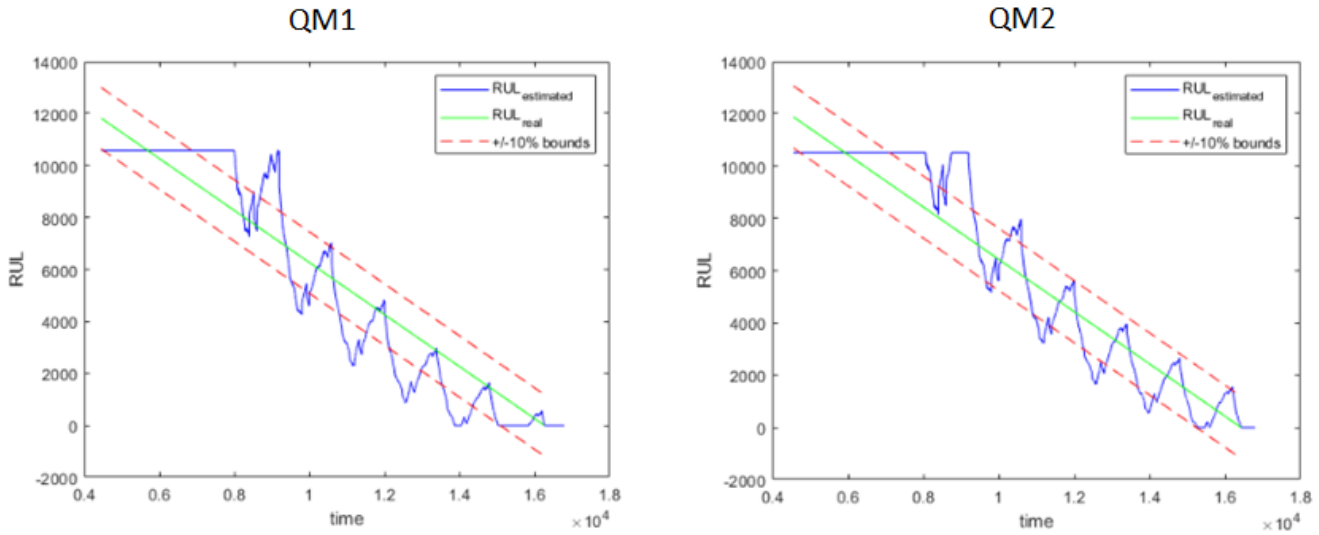

Figure 25 : RUL des moteurs QM1 et QM2 avec entrée (hypothèse 1)

Effectivement, l'influence de l'entrée sur les résultats de la RUL est plus visible pour les moteurs de qualification. Nous remarquons clairement que la RUL est bornée par son intervalle +/- 10% de RUL théorique (RUL_{real}) contrairement aux RUL sans entrée pour QM1 et QM2, ainsi que pour le reste des moteurs QM(voir annexe). La 2ème remarque qui montre l'importance de tenir en compte l'entrée est la diminution de la durée que l'algorithme prend pour converger vers la courbe de RUL_{real} (période de surestimation) qui passe de 1000s sans entrée à 500s avec entrée.

VIII - Perspectives et conclusion :

Les travaux menés pendant notre stage permettent, à partir d'un modèle hybride basé sur des données et sur l'hypothèse que les dégradations évoluent selon une fonction exponentielle, d'estimer l'état de santé du système ainsi que de prédire la durée de vie résiduelle (RUL). La méthodologie utilisée est basée sur un Filtre de Kalman Etendu qui permet d'estimer un paramètre variant dans le temps et sa(ses) dérivée(s) qui sont tous représentatifs de la dégradation. L'EKF fournit des bons résultats d'estimation de l'indicateur de santé (le rendement de la vitesse caractéristique dans notre étude) et sa tendance conduit à une estimation rapide et précise de la RUL. La méthodologie développée est capable également de fournir des résultats de pronostic pour des conditions de fonctionnement variantes qui reflèteraient mieux l'utilisation en réalité.

Les étapes qui peuvent être pour donner suite aux travaux présentés sur ce document sont l'intégration les entrées selon les hypothèses 2,3, et 4. Cela permettra de faire une comparaison générale des résultats de la RUL sans et avec entrée (les quatre hypothèses) pour chaque moteur et voir l'influence de l'entrée selon chaque hypothèse sur le calcul de la RUL. Ces travaux peuvent également être une base pour comparer l'influence de fonctionnement des moteurs en boucle ouverte et boucle fermée sur les résultats de RUL.

A l'heure du bilan, je dirais que mon stage a été une expérience pleine d'apprentissage et la mise en pratique des savoirs acquis lors de ma formation 'Maintenance, Management opérationnel, et Maîtrise des risques', ainsi que mon M2 en double diplôme 'Ingénierie des Systèmes Complexes'. J'ai une la chance de développer mes compétences professionnelles et personnelles. J'ai choisi de faire mon stage de fin d'études avec le CRAN en collaboration avec le CNES car les missions proposées étaient exactement ce dont j'avais besoin pour appliquer mes connaissances en maintenance et plus précisément en Prognostic & Heath Management (PHM).

Ce stage a été pour moi une confirmation de choix de carrière et m'a préparé et m'a motivé pour ma prochaine aventure professionnelle.

Résumé :

La nouvelle exigence de réutilisation du cycle de vie nominal des moteurs fusé à propulsion liquide (LPRE) afin de réduire leurs coûts, ainsi que les efforts constants d'amélioration des performances et la réduction de la masse ont conduit à une nouvelle réflexion des systèmes de surveillance de l'état de dégradation du moteur qui soient aussi capables d'une reconfiguration de leur point de fonctionnement en cas de détection d'un défaut ou d'une panne.

Ces systèmes de commande « conscients » de l'état de dégradation du moteur et/ou de ses composants doivent aussi prendre en compte ka prédiction de l'état de dégradation ainsi qu'une estimation de sa durée de vie résiduelle (RUL) et pourraient être déployés sur les nouvelles générations de moteurs fusé pour permettre un control qui se base à la fois sur l'état actuel et sur la prévision de l'état futur de dégradation du moteur avec un certain niveau de confiance.

Ce document présente d'une part les méthodologies appliquées pour atteindre ces objectifs, d'autre part, les résultats obtenus et le travail réalisé, ainsi, que les apports de ce stage.

Résumé (anglais) :

The new requirement to reuse the nominal life cycle of Liquid Propulsion Rocket Engines (LPRE) in order to reduce their costs, together with the constant efforts to improve performance and reduce mass have led to a new thinking in monitoring of the state of degradation of the engine which is also capable of reconfiguring their operating point in the event of detection of a fault or failure.

These control systems "aware" of the state of degradation of the engine and/or its components must also take into account the prediction of the state of degradation as well as an estimate of its remaining life (RUL) and could be deployed on new generations of rocket engines to allow control which is based both on the current state and on the prediction of the future state of degradation of the engine with a certain level of confidence.

This document presents on the one hand the methodologies applied to achieve these objectives, on the other hand, the results obtained, and the work carried out, as well as the contributions of this internship.

BIBLIOGRAPHIE

[1] A. Rahimi, «Failure Prognosis for Satellite Reaction Wheels Using Kalman Filter and Particle Filter,» *Journal of Guidance, Control, and Dynamics,* pp. 585-588, 2019.

[2] J. Z. Sikorska, «Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry,» *ScienceDirect Mechanical Systems and Signal Processing,* pp. 1803-1836, 2011.

[3] K. Kawatsu, «PHM by Using Multi-Physics System-Level Modeling and Simulation for EMAs of Liquid Rocket Engine,» *2019 IEEE Aerospace Conference,* pp. 1-10, 2019.

[4] H. Durrant-Whyte, «Introduction to Estimation and the Kalman Filter,» The University of Sydney NSW 2006, Australia, 2001.

[5] M. S. Grewal, Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB, John Wiley & Sons, 2014.

[6] F. L. Lewis, Optimal Control, John Wiley & Sons, 2012.

[7] M. Bressel, «Extended Kalman Filter for prognostic of Proton Exchange Membrane Fuel Cell,» *ScienceDirect Applied Energy,* pp. 220-227, 2016.

[8] K. Kawatsu, «PHM by Using Multi-Physics System-Level Modeling and Simulation for EMAs of Liquid Rocket Engine,» *IEEE Xplore ,* pp. 1-10, 2019.

Annexes

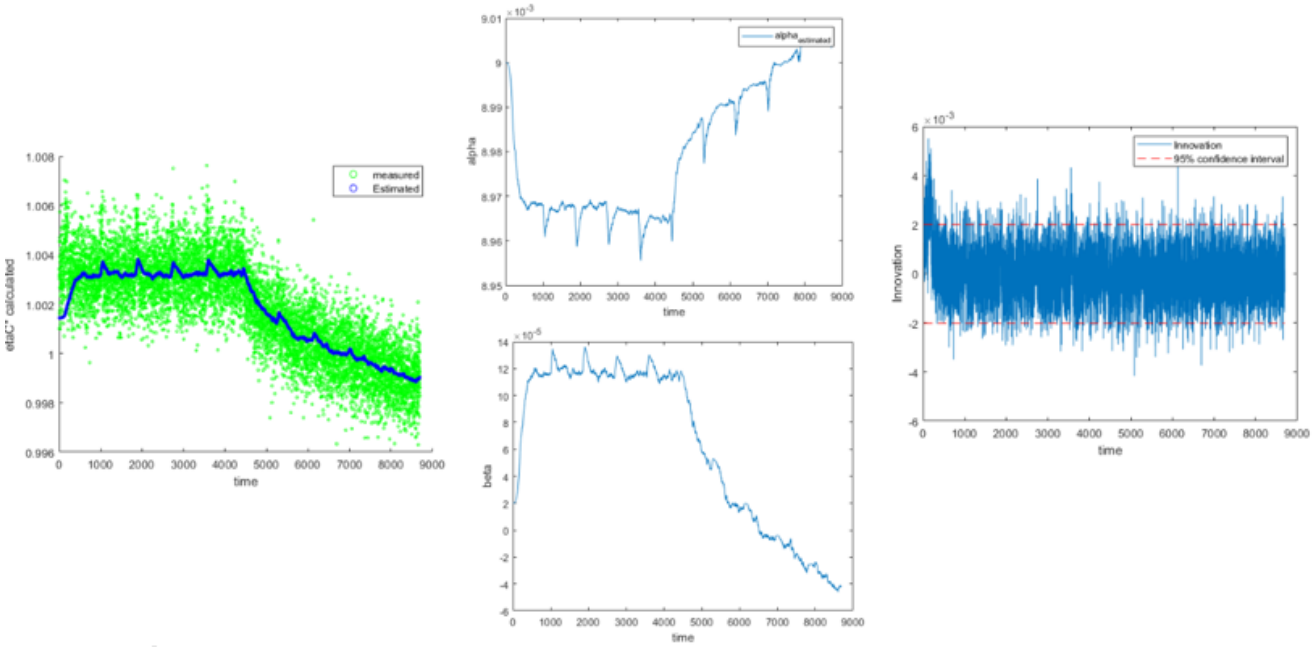

Figure 26 : Estimations EKF avec entrée (hypothèse 1) pour le moteur FM3

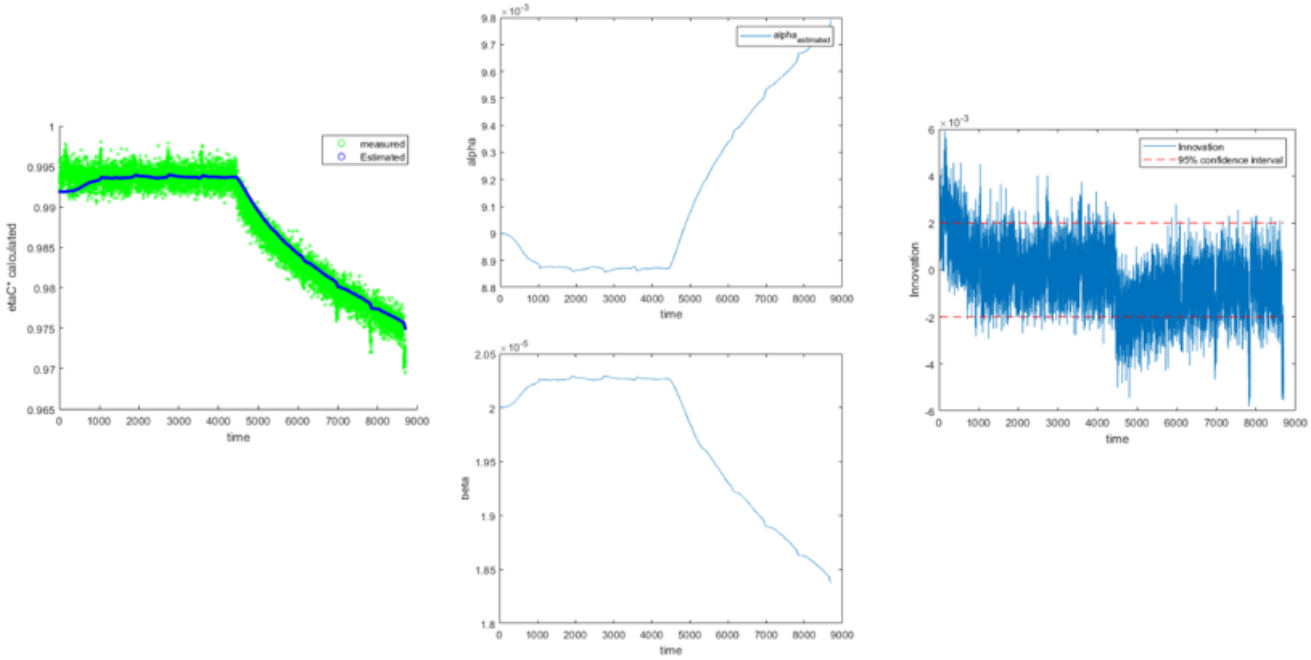

Figure 27 : Estimations EKF avec entrée (hypothèse 1) pour le moteur FM4

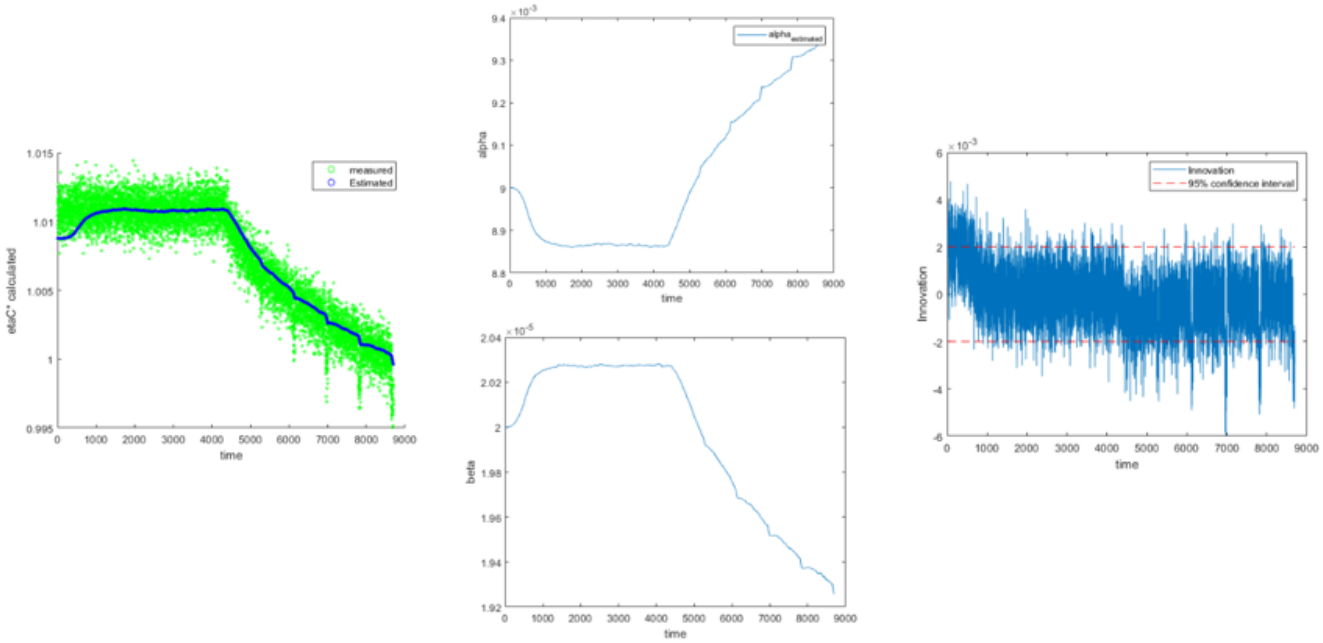

Figure 28 : Estimations EKF avec entrée (hypothèse 1) pour le moteur FM5

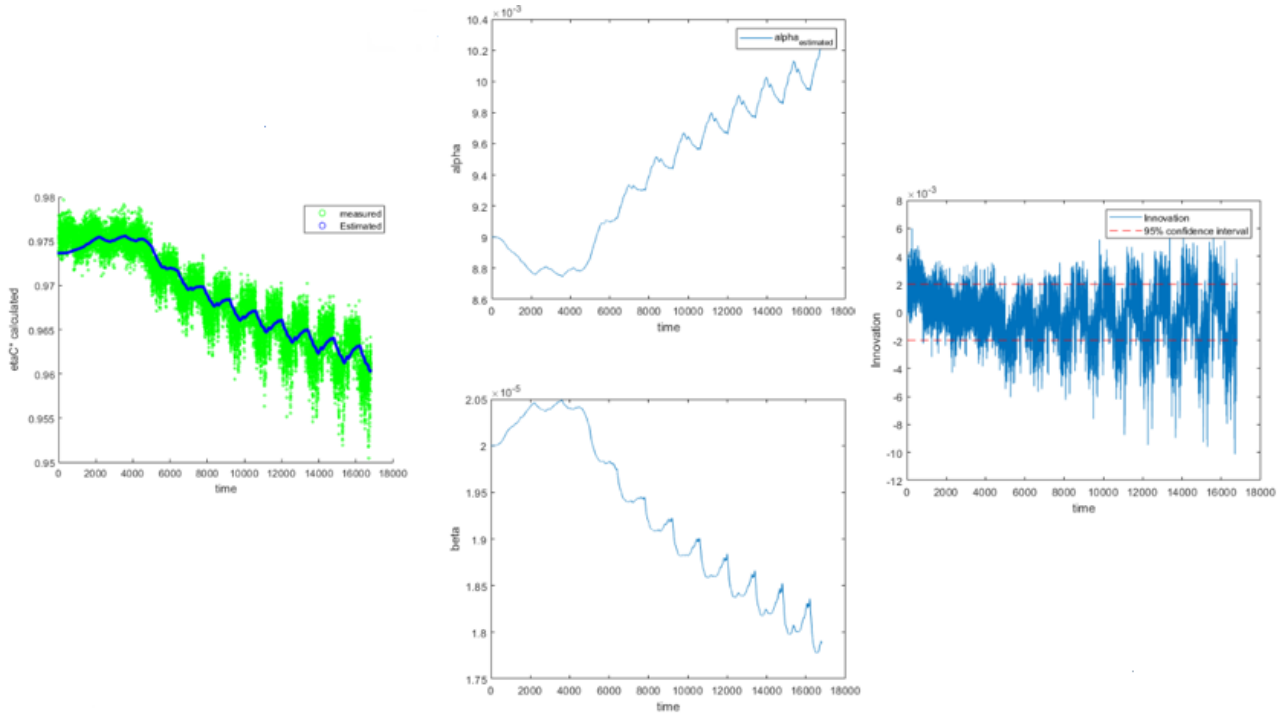

Figure 29 : Estimations EKF avec entrée (hypothèse 1) pour le moteur QM3

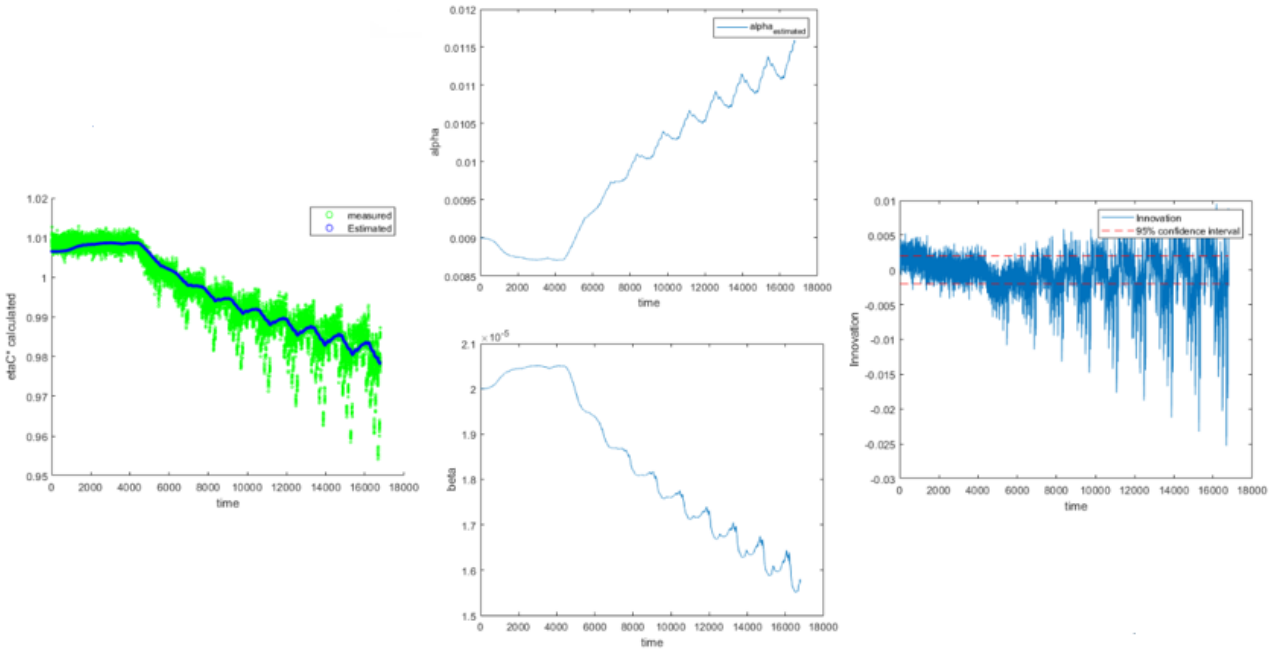

Figure 30 : Estimations EKF avec entrée (hypothèse 1) pour le moteur QM4

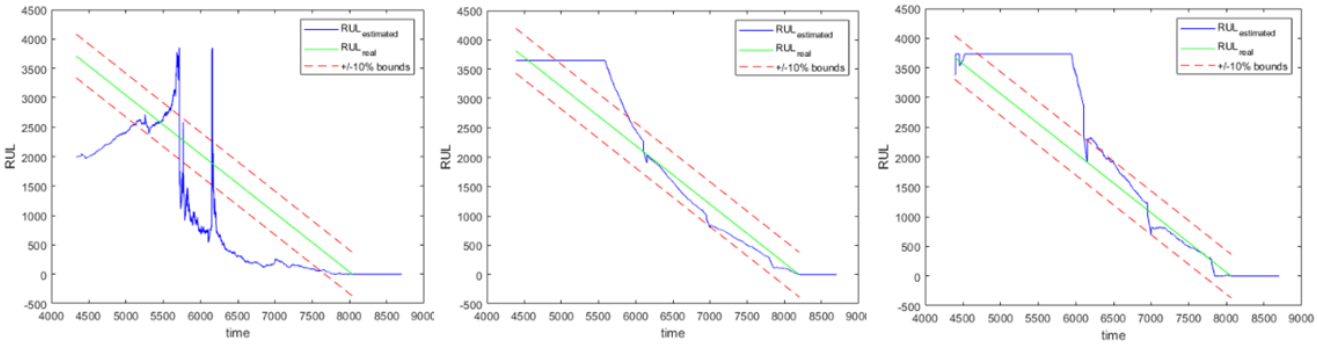

Figure 31 : Résultats de la RUL avec entrée (hypothèse 1) pour FM3 (à gauche), FM4 (au milieu), et FM5 (à droite)

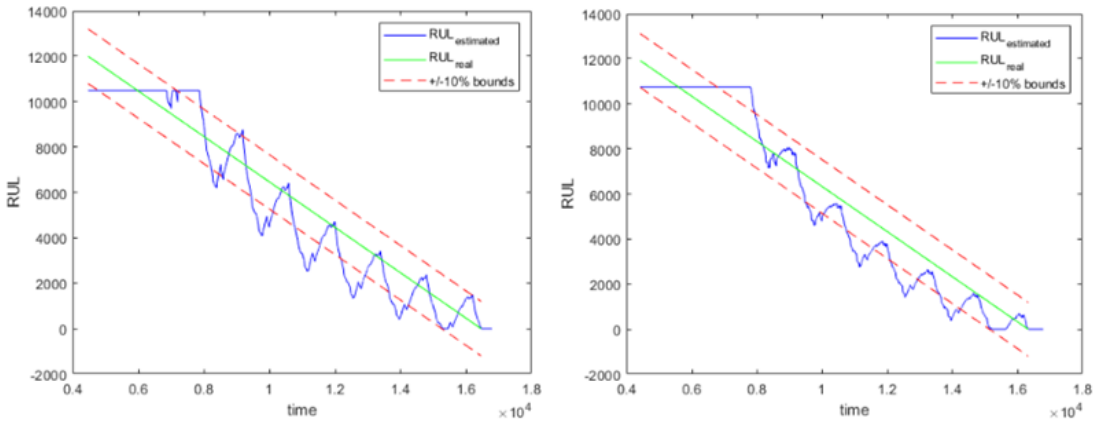

Figure 32 : Résultats de la RUL avec entrée (hypothèse 1) pour QM3 (à gauche), et QM4 (à droite)