



# Modélisation de l'impact des dispersions des moteurs sur leurs performances



**María NAVAS LORO**

SNECMA Villaroche

Tuteur de stage : Jérôme LACAILLE

Tuteur Académique : Olivier LAFITTE

Tuteur Erasmus : Adolfo QUIRÓS

Version	Date	Auteur	Changements
0.5	22/05/2014	María NAVAS LORO	Création, structuration
0.9	23/06/2014 - 28/07/2014	María NAVAS LORO	Rédaction
1.0	28/07/2014	María NAVAS LORO	Révision et relecture
1.1	08/08/2014	María NAVAS LORO	Des précisions ajoutées
1.2	08/09/2014	María NAVAS LORO	Révision définitive
1.3	16/09/2014	María NAVAS LORO	Correction orthographique

# TABLE DES MATIERES

---

RÉSUMÉ	7
<hr/>	
REMERCIEMENTS	8
<hr/>	
L'ORGANISME D'ACCUEIL	9
<hr/>	
Le Groupe Safran.....	9
Les entreprises du Group Safran.....	11
Snecma .....	13
Pronostic Health Monitoring.....	15
Le trafic aérien d'aujourd'hui.....	15
L'intérêt du monitoring.....	16
Monitoring à Snecma .....	18
Pôle Monitoring .....	19
LE STAGE	20
<hr/>	
Objectif.....	20
Analyse de la performance.....	20
Gestion de données .....	22
Déroulement du stage.....	22
Durée et conditions.....	22
Développement et jalons.....	23
Jalons académiques .....	25
Planification du stage.....	26

## OUTILS 28

---

Plateforme SAMANTA .....	28
L'objet signal .....	28
L'objet opset.....	29
L'objet mnode .....	30
L'interface graphique .....	30
Traitement de données.....	31
SQLite .....	34
L'outil.....	34
Composantes.....	34
Algorithme de normalisation .....	35
Fonctionnement de normctx .....	35
Exemple d'utilisation.....	36

## RÉSULTATS 38

---

Première approche à la consommation : zone du climb .....	38
Moteur 1 – Avion A .....	38
Comparaison globale.....	40
Feedback de la RIM Début du stage.....	42
Étude de la consommation .....	42
Variables.....	42
Nouveau indicateur : $\Delta t$ décollage .....	43
Nouvelles visualisations .....	44
Réunion répétition RIM.....	45
Création de la base de données .....	46
Conception .....	46

Création et remplissage .....	47
Optimisation.....	48
Accès et opérations.....	48
Résultats.....	49
<b>RÉCAPITULATION / TRAVAIL ENVISAGÉ</b>	<b>50</b>
Analyse .....	50
Gestion de données .....	50
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>51</b>
Difficultés .....	51
Contributions.....	51
<b>ANNEXE 1 : L'HISTOIRE DE SAFRAN</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXE 2 : L'HISTOIRE DE SNECMA</b>	<b>57</b>
<b>ANNEXE 3 : LES MOTEURS DE SNECMA</b>	<b>59</b>
MOTEURS CIVILS .....	59
MOTEURS MILITAIRES .....	65
MOTEURS SPATIAUX .....	67
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>69</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>72</b>



# RÉSUMÉ

---

Ce rapport rend compte des 14 premières semaines du stage « Modélisation de l'impact des dispersions des moteurs sur leurs performances » chez Snecma.

Le but du stage est faire une étude statistique de la performance des moteurs (spécialement de l'aspect consommation) pour pouvoir mieux prédire leurs comportements, les classer et donc optimiser leur maintenance. Cette analyse est construite sur un premier travail de recueil des données (Big Data): on a un grand nombre de vols et beaucoup de variables à regarder, donc on aura besoin d'un système de gestion de données adéquat pour pouvoir effectuer l'étude.

# REMERCIEMENTS

---

Pour commencer, je présente mes plus sincères remerciements à toutes les personnes chez Snecma qui m'ont aidé et soutenu au cours de ce stage, dans les présentations ou dans les activités au jour le jour, et qui ont contribué à la réussite de cette année.

Je tiens plus concrètement à remercier toute l'équipe du Pôle Monitoring pour sa gentillesse et sa volonté à m'aider et ses leçons (pas seulement académiques) au cours de ce stage, spécialement des autres stagiaires qui ont fait leurs stages en même temps que moi.

Je remercie plus particulièrement mon tuteur Jérôme LACAILLE pour m'avoir fait confiance sur ce projet, son affabilité et sa patience avec mon Français et surtout pour le temps qu'il m'a dédié malgré son emploi du temps très chargé.

De plus, je tiens à adresser mes remerciements à Olivier LAFITTE, Emmanuel AUDUSSE, Christian LAFOND, Marc WOUTS et très spécialement Adolfo QUIRÓS, sans lesquels je ne serais pas ici, et à mes professeurs à Paris 13 pour leur compréhension et leurs excellents enseignements.

Pour finir, j'adresse une pensée à ma famille et mes proches, ici où à distance, qui m'ont encouragé et apporté leur soutien durant mon expérience parisienne.



# L'ORGANISME D'ACCUEIL

## Le Groupe Safran

Safran est un grand groupe industriel et technologique français créé le 11 mai de 2005 lors de la fusion entre Snecma et Sagem, et présent au niveau international dans les domaines de l'aéronautique, l'astronautique, la défense et la sécurité. Les activités du group Safran sont regroupées en trois grands métiers:

- Aéronautique et espace, secteur où on peut trouver Snecma
- Défense
- Sécurité



Figure 1 : Domaines du groupe Safran

## 66 300 COLLABORATEURS DANS LE MONDE ENTIER

Aéronautique, spatial, défense, sécurité : Safran évolue sur des marchés mondiaux. Ses implantations dans plus de 50 pays garantissent proximité et réactivité à ses clients.

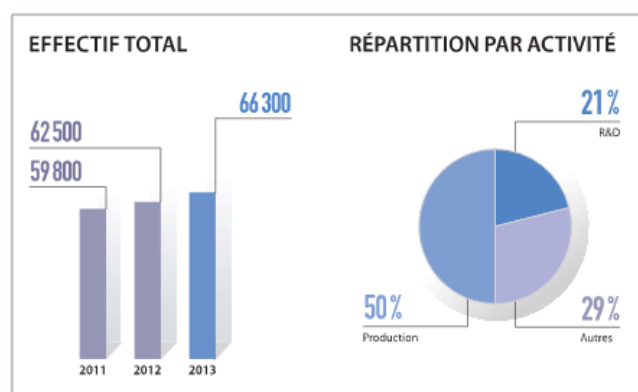
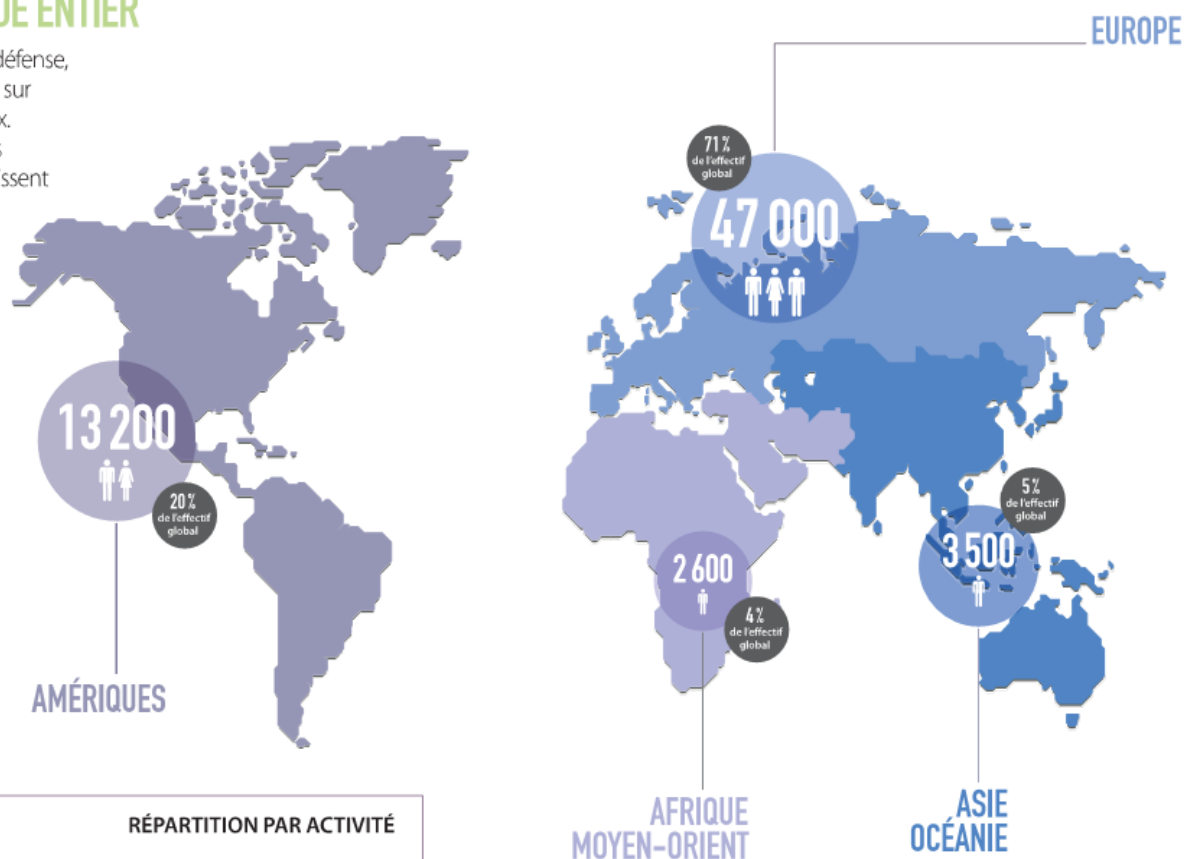


Figure 2 : Effectifs Safran dans le monde

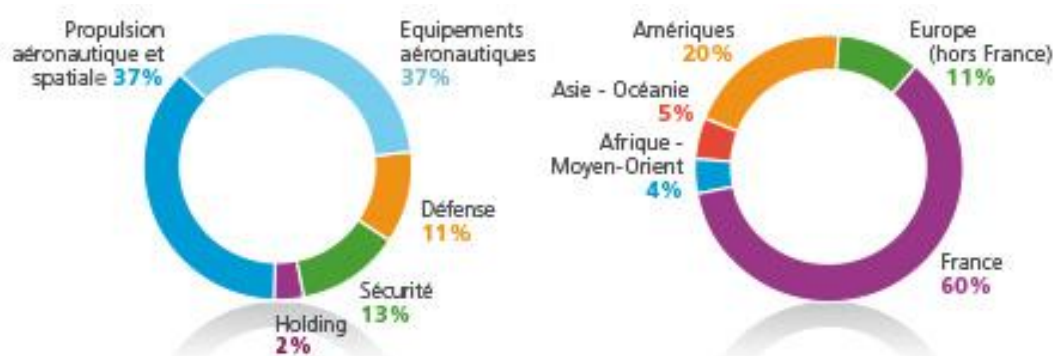


Figure 3 : Effectifs Safran par activité et distribution géographique (2013)

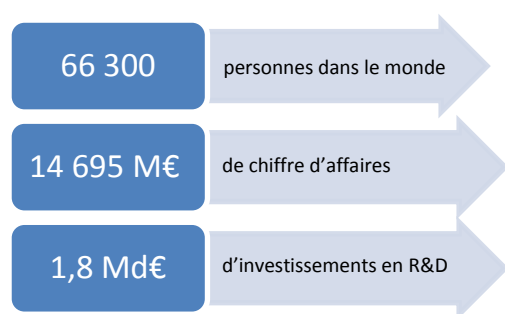


Figure 4 : Safran en chiffres (2013)

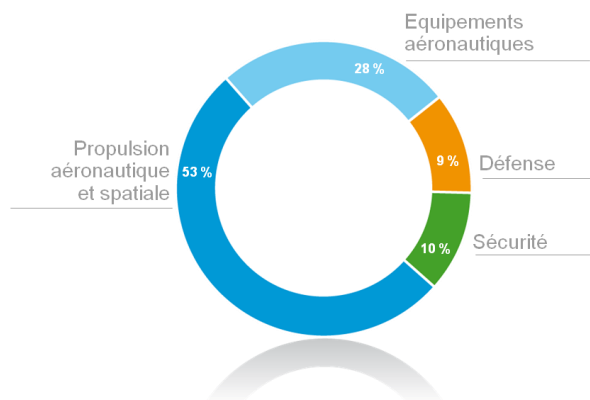


Figure 5 : Chiffres d'affaire par domaine à Safran (2013)

## Les entreprises du Group Safran

Les principales sociétés du Groupe sont réparties dans l'un des ces trois métiers selon leur domaine d'activité.

AÉRONAUTIQUE ET ESPACE	
<b>Snecma</b>	Motoriste aéronautique et spatial de premier rang, Snecma conçoit, développe, produit, et commercialise, seul ou en partenariat, des moteurs pour avions civils et militaires, lanceurs spatiaux et satellites. Le motoriste propose également aux compagnies aériennes, aux forces armées et aux opérateurs d'avions une gamme complète de services de maintenance et support (MRO).
<b>Turbomeca</b>	Leader mondial des turbines à gaz pour hélicoptères, Turbomeca offre une gamme complète - et unique au monde - de turbomoteurs. La société motorise les hélicoptères civils, parapublics et militaires des principaux hélicoptéristes dans le monde. Turbomeca fabrique également des turboréacteurs pour avions et missiles.
<b>Techspace Aero</b>	Techspace Aero conçoit, développe et produit des modules, des équipements pour moteurs d'avions (civils et militaires) et d'engins spatiaux. La société est aussi spécialisée dans la conception, l'installation et la modernisation de bancs d'essais, sous la marque Cenco InternationalTM.
<b>Herakles</b>	Moteurs-fusées à propergol solide pour lanceurs spatiaux et missiles, matières premières énergétiques, équipements pyrotechniques, matériaux composites thermo structuraux et organiques pour la défense, le spatial, l'aéronautique, la sécurité automobiles et l'industrie.
<b>Messier-Bugatti-Dowty</b>	Leader mondial des fonctions d'atterrissage et de freinage pour aéronefs, Messier-Bugatti-Dowty couvre le cycle de vie complet de ses produits, depuis la conception et la fabrication jusqu'à la maintenance et la réparation. Messier-Bugatti-Dowty est partenaire de 33 avionneurs dans les domaines du transport civil, régional et d'affaires et dans le domaine militaire. La société assure le support de plus de 22000 avions.

<b>Aircelle</b>	Leader sur le marché mondial des nacelles pour moteurs d'avions commerciaux, Aircelle fournit des nacelles complètes pour avions, des matériaux composites pour aérostructures ainsi que le support et les services associés. Aircelle est notamment le nacelliste intégrateur des deux motorisations de l'Airbus A380.
<b>Labinal Power Systems</b>	Leader mondial sur le marché des systèmes électriques pour le marché de l'aéronautique, incluant l'ensemble de la chaîne électrique (génération, distribution, conversion, câblage, gestion de la charge, ventilation). Labinal Power Systems propose aussi des solutions d'ingénierie pour l'aéronautique, l'automobile et le ferroviaire.
<b>Hispano-Suiza</b>	Leader mondial sur le marché des transmissions de puissance, Hispano-Suiza conçoit et développe des solutions innovantes dans le domaine de l'extraction et de la transmission de puissance mécanique par engrenages pour moteurs d'avions et d'hélicoptères, civils et militaires.
<b>DÉFENSE</b>	
<b>Sagem</b>	Positionné sur les marchés civils et de défense, Sagem dispose des meilleures technologies et services associés dans les domaines de l'optronique, de l'avionique (n°1 des commandes de vol pour hélicoptères), de l'électronique et des logiciels critiques. La société conçoit et développe également des systèmes de drones tactiques.
<b>SÉCURITÉ</b>	
<b>Morpho</b>	Leader mondial en biométrie à base d'empreintes digitales, expert en technologies multi biométriques, dans le domaine des cartes à puce, des transactions sécurisées et des solutions de gestion d'identité, Morpho répond aux besoins nouveaux de sécurité des citoyens, des entreprises et des États.

## Snecma

Snecma est une société du Groupe Safran responsable de la conception, la construction et commercialisation des moteurs d'avion (civils ou militaires), lanceurs spatiaux et satellites. Elle a plusieurs sites en France:



Figure 6 : Implémentation de Snecma en France

Mon stage s'est déroulé au sein de l'établissement de Villaroche, situé à 50 km au sud-est de Paris. Il a été créé en 1947, sur 86 hectares au milieu des plaines de la Brie, pour les essais au sol et en vol des moteurs civils et militaires, il s'est fortement développé, devenant un pôle d'études et d'essais.

Le site abrite la division Moteurs civils (assemblage, essais), la division Moteurs militaires (assemblage et essais) ainsi que les directions Technique (recherche, conception, développement, certification des moteurs) et Commerciale de Snecma.



Figure 7 : Moteurs à Villaroche



L'éventail des métiers représentés dans ce site est très large : Villaroche est une plate-forme où plus de 2 500 ingénieurs, cadres et techniciens interviennent en amont de la production. Ils réalisent toutes les étapes de la recherche avancée, de la conception et du développement. Les techniciens et ouvriers du site mènent sur les sous-ensembles de moteurs les opérations de montage, d'assemblage final et d'essais avant livraison au client.



Figure 8 : Site de Villaroche

Le site possède 12 bancs d'essais moteurs - dont celui du GE90, l'un des deux plus grands bancs d'essais fermés d'Europe - et une quarantaine d'installations d'essais partiels. Il accueille également d'autres sociétés du groupe Safran, Hispano-Suiza, Safran-Power, Safran Engineering Services, ainsi que le musée aéronautique et spatial du groupe.

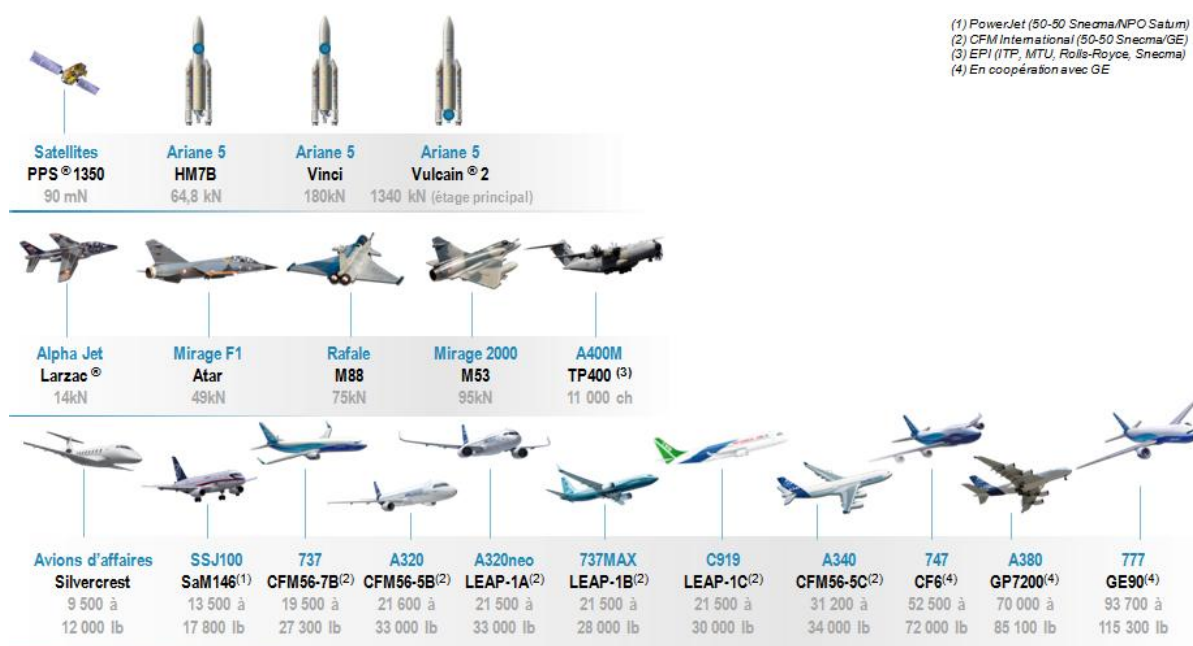


Figure 9 : Principaux moteurs développés à Snecma (voir Annexe 3)

## Pronostic Health Monitoring

### Le trafic aérien d'aujourd'hui

De nos jours, l'avion est devenu un moyen de transport basique et indispensable. Il permet aussi bien des échanges internationaux que nationaux en des temps très courts. Le trafic aérien est constamment en croissance, l'IATA (International Air Transport Association) donne une estimation d'une croissance à 5% par an du nombre de passagers et du transport de fret pour les années à venir. Cela entraîne que le trafic aérien se densifie, les infrastructures se sont développées et les réseaux sont souvent saturés. En témoignent ces estimations :



Figure 10 : Représentation du trafic aérien en Europe

- 24 000 avions commerciaux dans le monde
- Environ 80 000 vols par jours
- Un avion décolle presque toutes les secondes
- Environ 500 000 personnes dans le ciel à tout instant



Figure 11 : Trafic aérien mondial en 2009

A noter également une croissance continue de ces chiffres avec des gradients annuels souvent importants (voir Figure 12).

Suite à cet important essor, les compagnies aériennes se doivent d'assurer la fiabilité du service, donc une gestion optimale et un entretien adéquat la flotte, et de leurs moteurs, une panne pouvant nuire fortement à la compagnie et à ses passagers.



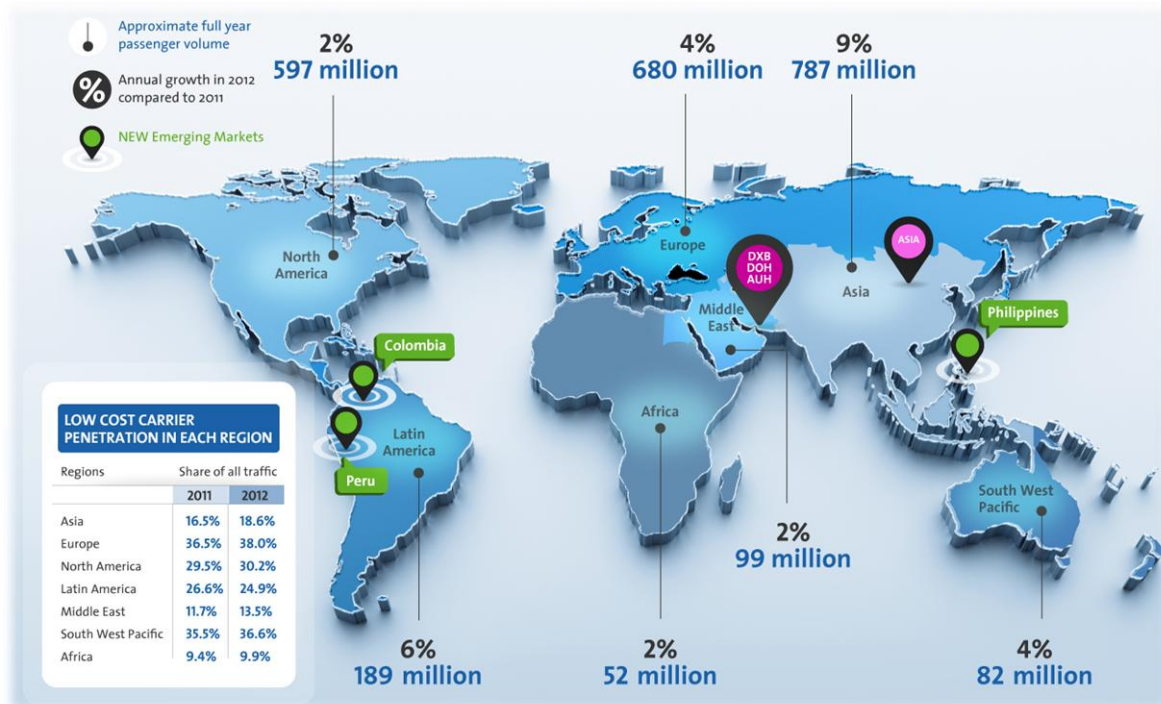


Figure 12 : Tendances de croissance des passagers (2011-2012)

## L'intérêt du monitoring

Une compagnie aérienne se doit d'assurer la fiabilité de sa flotte et la sécurité de ses passagers, qui sont des critères importants pour la renommée de la compagnie. Pour cela que des maintenances de moteurs, pièces maitresses de l'appareil, sont planifiées.

Par ailleurs les coûts de maintenance d'un avion commercial au long de sa vie sont considérées comme trois fois le prix initial de l'appareil, les compagnies cherchent donc à réduire ces coûts tout en maintenant la sureté d'utilisation des avions à son niveau certifié. De plus, les maintenances non prévues coûtent bien plus chères que les autres, et la perte due au maintien au sol d'un avion de la taille d'un Boeing 737NG est d'environ 50 000\$ par jour.



Figure 13 : 24h du trafic Européen (2014)

Le monitoring a pour mission la surveillance de différents composants, un suivi de leur usage et de détecter des prémices d'anomalies avant une dégradation trop importante.

Un système de Health monitoring performant permet de prévoir les pannes avant qu'elles ne se produisent et ainsi de planifier la maintenance sans trop perturber l'exploitation de l'appareil et donc de minimiser les coûts associés. Le monitoring passe par deux concepts :



- L'amélioration de la supervision et du diagnostic de défaillances
- L'introduction de l'idée de pronostic ou d'anticipation de défaillance.



Figure 14 : Trafic aérien en temps réel (21/07/2014)

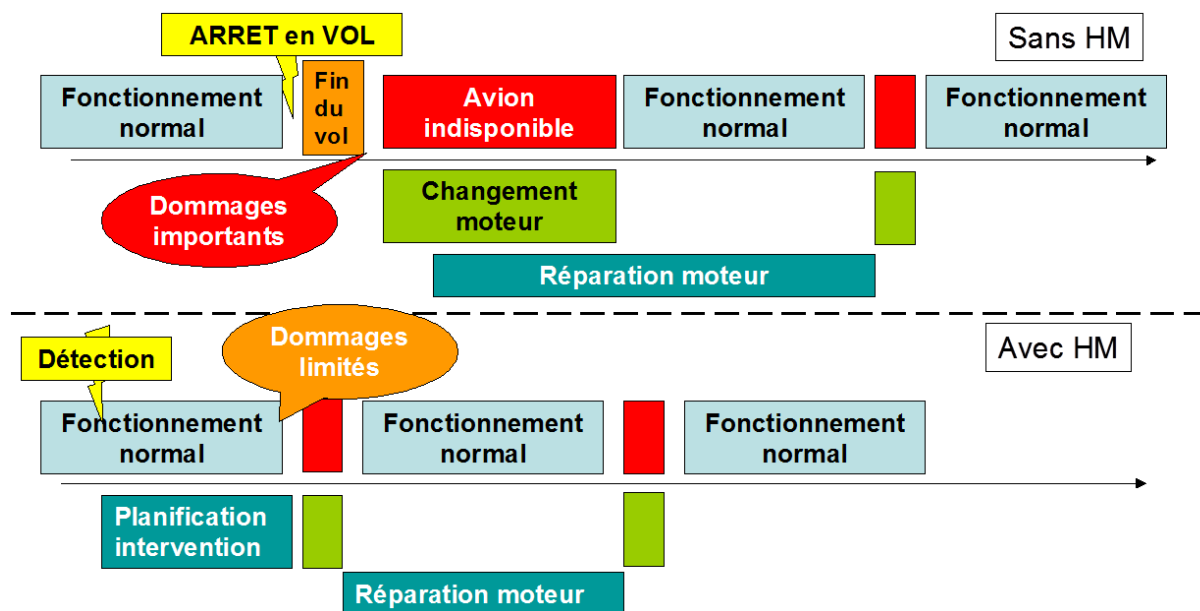


Figure 15 : Vie d'un avion sans et avec Health Monitoring

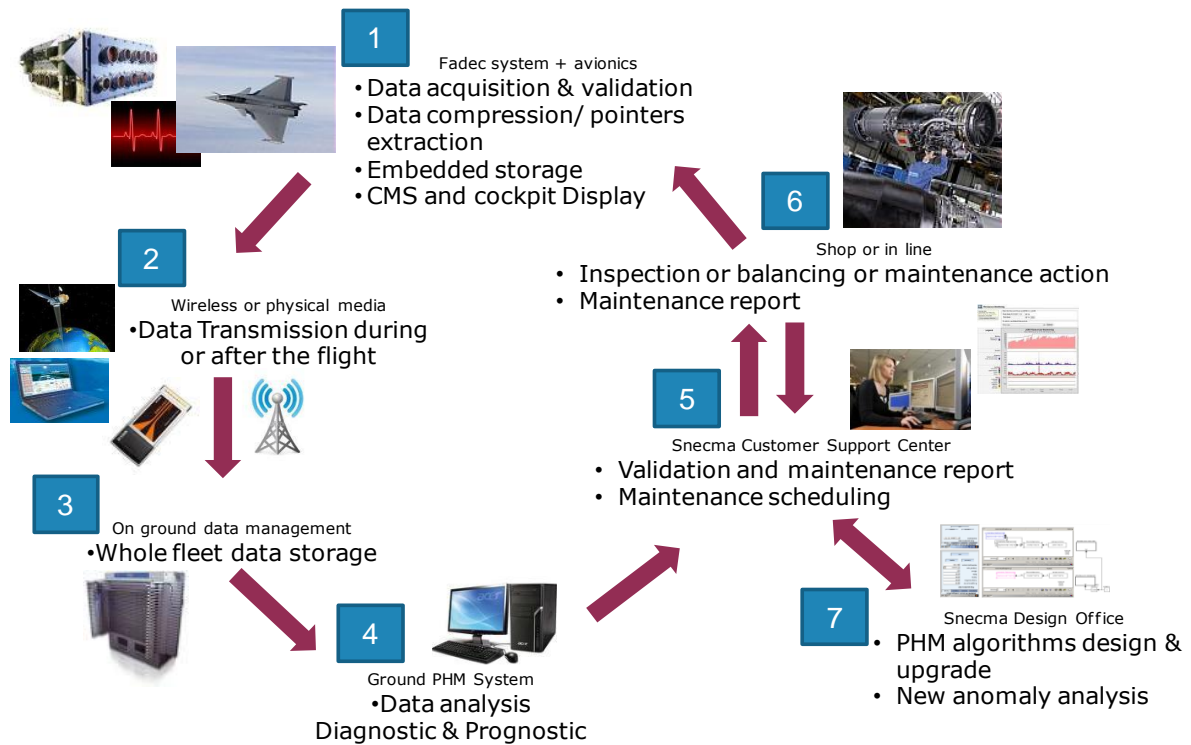


Figure 16 : Cycle PHM Snecma

## Monitoring à Snecma

Le monitoring chez Snecma a commencé avec l'entrée en service du CFM56, le moteur le plus vendu dans le monde (voir Annexe 3). La quantité de moteurs et donc de données a rendu nécessaire la création d'un système automatisé pour suivre leurs évolutions et planifier leur maintenance. Ce système, appelé « monitoring », est composé d'une partie hardware (des capteurs, les harnais, le boîtier embarqué et le système sol) et d'une partie software (algorithmes). Les capteurs recueillent des mesures durant différentes phases du vol ; ils permettent de récupérer à distance des informations concernant le moteur, qui sont utilisées ensuite pour suivre et contrôler son état, déterminer des situations anormales, classifier ou détecter les prémices de panne.

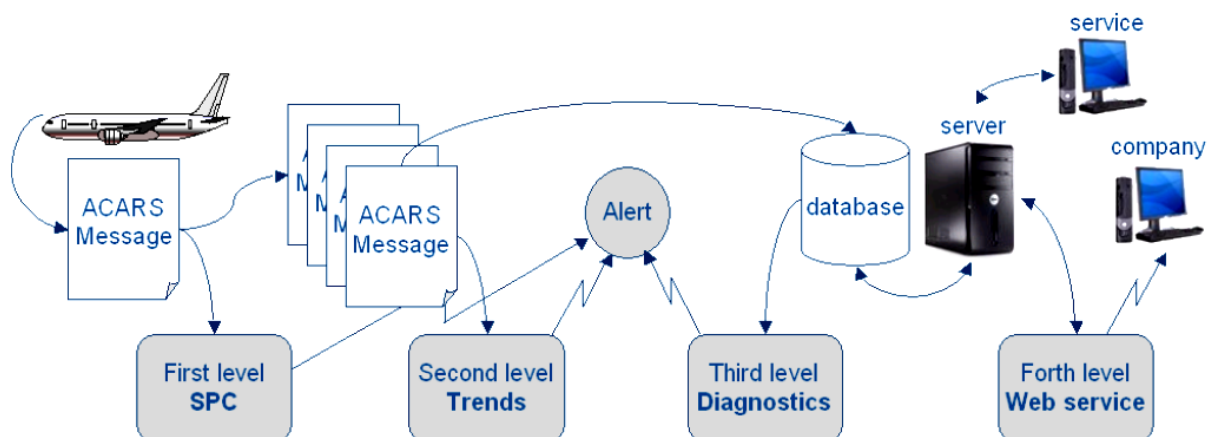


Figure 17 : Phases Système Health Monitoring

## Pôle Monitoring

Le département Pronostic, Health Monitoring a été créée en 2006 pour développer un système de suivi. Sa mission est de recueillir les besoins et de proposer en réponse des solutions Health Monitoring. Le pôle monitoring doit offrir des solutions qui, à partir de l'analyse de données de vol, permettent l'identification de prémices de pannes.

Ce pôle s'appuie sur un expert algorithme, Jérôme LACAILLE, titulaire d'un doctorat en mathématiques et habilité à diriger des recherches, ayant rejoint la Snecma en 2007 et ayant occupé plusieurs postes de consultant et de professeur auparavant. Son rôle consiste à apporter les techniques mathématiques de base nécessaires à l'élaboration d'algorithmes performants, à faire émerger des solutions innovantes, à suivre les innovations dans le domaine des mathématiques appliquées et à représenter Snecma sur un plan scientifique.

C'est précisément sous sa tutelle que mon stage s'est déroulé dans le Pôle Monitoring.

# LE STAGE

## Objectif

Le sujet de stage est d'effectuer une analyse statistique de plusieurs vols d'avions sur différents indicateurs de performance (consommation, le temps de montée...) On cherche à identifier les principaux facteurs qui influent sur cette performance. On organise les vols en groupes de comportements similaires et on recherche une explication au comportement des vols sensiblement différents d'un même avion. De cette manière on pourra suivre l'activité des moteurs d'un avion et planifier plus efficacement sa maintenance.

Pour réaliser cette analyse, on dispose de données d'un grand nombre de vols, mais recueillies de manière diverses et parfois peu efficace car difficiles à exploiter. Pour faciliter et optimiser l'accès à ces données, la recherche et la sélection des informations pertinentes sera primordiale (un travail de type « Big Data »). La première étape de ce travail est la lecture et la conversion des données du format original au format de l'entreprise, puis la création d'une base de données de vol.

On a alors deux tâches : d'abord, la gestion des données et puis l'analyse de la performance des vols.

## Analyse de la performance

Pendant le déroulement du stage, plusieurs indicateurs ont été proposés : la pente de l'EGT (Température des Gaz d'Échappement, voir (Lacaille, et al., 2013)), le temps pour le décollage... mais sans doute le principal indicateur de la performance reste la consommation du carburant. À priori on sera intéressés à l'étude de la consommation sur deux parties du vol situées dans deux phases du vol différentes (Figure 18)

- La première partie du vol que j'étudie appartient à la phase de montée « climb » ( $C_{CL}$ ), entre 10000 à 30000 pieds d'altitude (voir Figure 19).
- La deuxième partie ( $C_{CR}$ ) se déroule pendant la phase croisière ; on choisira un créneau sans des irrégularités pour l'analyse (sans des turbulences ou des changements brusques).

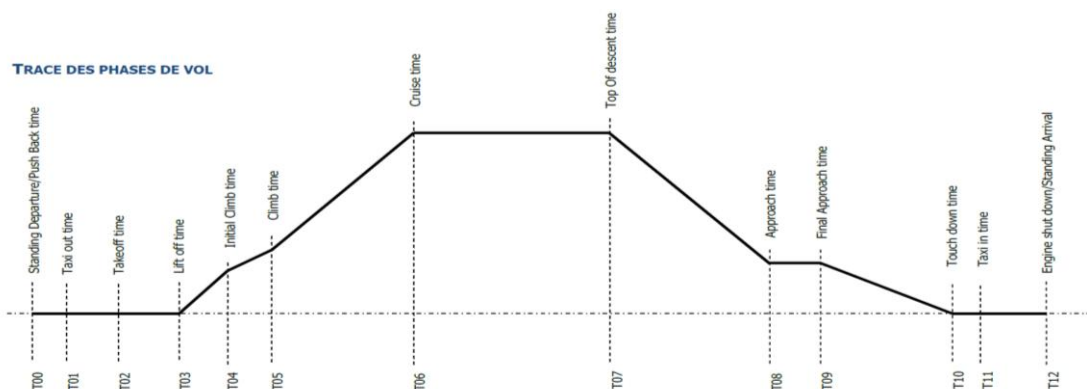


Figure 18 : Phases du vol

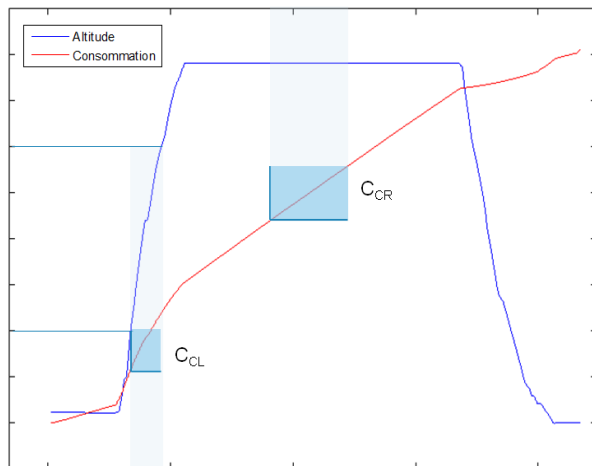


Figure 19 : Zones d'intérêt pour l'analyse consommation

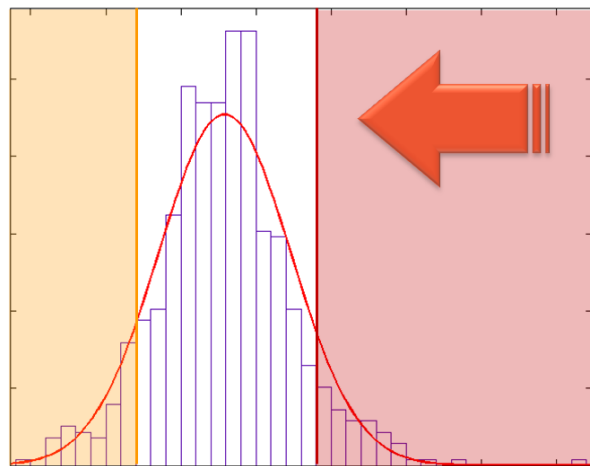


Figure 20 : Distribution de la consommation

Après avoir défini nos zones d'intérêt, on voudrait répondre à trois questions clés sur la distribution de la consommation (voir Figure 20) sur chaque de ces zones:

- Pourquoi les vols de la zone jaune ont ils une consommation moins importante?
- Pourquoi les vols de la zone rouge ont ils une consommation plus forte?
- Peut-on faire quelque chose pour tous les ramener plus près de la zone jaune?

Pour obtenir la consommation durant chacune de ces périodes de vol, on prend le Fuel Flow du moteur que l'on intègre et finalement on calcule la différence de consommation entre le début et la fin de chaque période (Figure 21).

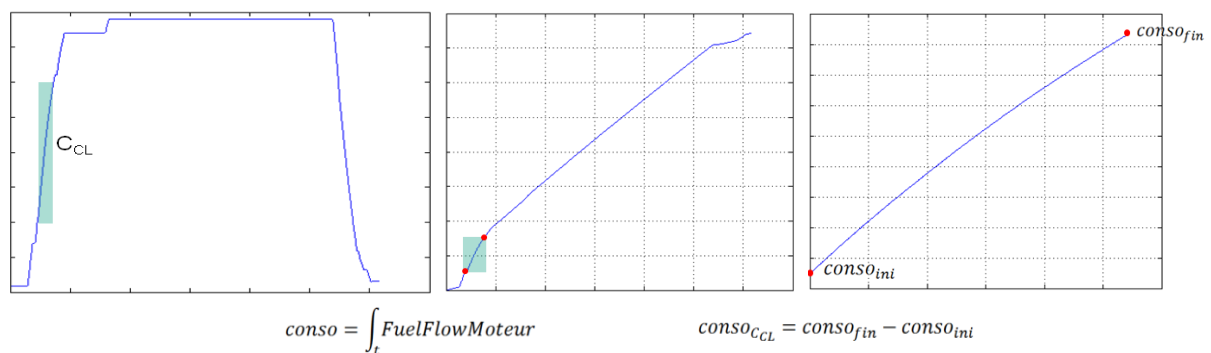


Figure 21 : Obtention de la consommation

## Gestion de données

On va travailler sur les données de 4 avions avec 2 moteurs chacun:

Nom de l'avion	Quantité de vols
A	260
B	766
C	732
D	805

Tableau 1 : Avions et vols à analyser

On a un total de 2563 vols. Chaque vol implique 2 moteurs et 78 variables comme l'altitude, la vitesse MACH... (Décrites plus bas.) Chaque variable est enregistrée dans un vecteur composé en moyenne de 10500 mesures. En termes de stockage, ça veut dire 8,95 Go de fichiers au format CSV (Comma Separated Values) et 902 Mo d'opsets (Operations Sets) après la conversion au format SAMANTA (c'est le format base Matlab propre à Snecma, on le présentera ensuite).

La manipulation d'une telle quantité de données est très lourde, en particulier lors des phases de prétraitement :

- La conversion prend environ 3 heures par avion.
- Le filtrage des vols adéquats (ceux qui volent plus haut que 30000 pieds) prend 4 min.
- Finalement, lire l'opset prends environ 2 minutes (pour un avion).

2 min seulement pour lire des données d'un avion est, sans doute, beaucoup mieux que 3 heures, mais pourquoi lire toutes les données ? Ne peut on pas filtrer l'info, accéder seulement aux données nécessaires à chaque instant ? Comme on le verra après, la solution à ce problème sera la création d'une base de données, accessible via Matlab et plus rapide et versatile que le format SAMANTA.

## Déroulement du stage

### Durée et conditions

Le stage dure 26 semaines, à partir du 12 mai et se termine le 7 Novembre. Du fait du calendrier imposé par l'université pour présenter le rapport avant le 14 Septembre et de la politique de protection des données de Snecma (selon laquelle le rapport doit être soumis quelques semaines avant le départ pour sa vérification et l'approbation de sa diffusion hors du cadre de l'entreprise), ce rapport ne couvre que les 3 premiers mois de stage. Néanmoins un rapport définitif sera aussi présenté à la fin du stage. Par ailleurs, pour des raisons de confidentialité, les graphiques et quantités ne précisent pas les valeurs des mesures.

## Développement et jalons

### RIMs

Les stagiaires Snecma sont tenus de présenter régulièrement l'avancement de leur stage aux membres de l'entreprise. Pour cela, on organise des réunions pluri disciplinaires (appelés RIM, Réunion Inter-Modules) avec les gens qui peuvent être liées au sujet du stage ou qui sont en mesure de proposer ou introduire des idées et points de vue intéressants. Pour ces réunions, le stagiaire prépare des planches pour aborder des différents aspects de son stage.

Normalement, on fait 3 RIMs:

	Nom RIM	Date approximée	Contenu	Date de la mienne	
	RIM début de stage	Un mois après l'arrivée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présentation du stagiaire (formation, parcours)</li> <li>- Sujet de stage</li> <li>- Idées envisagées</li> <li>- Premiers résultats</li> <li>- Planning prévisionnel</li> </ul>	20/06/2014	
	RIM mi-stage	Au milieu du stage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évolution et résultats statistiques</li> <li>- Base de données</li> <li>- Planning</li> </ul>	05/09/2014	
	RIM fin de stage	La dernière semaine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résultats obtenus</li> <li>- Conclusions</li> </ul>	Début novembre	

Tableau 2 : Présentation des RIMs

Comme on le verra ultérieurement, on obtient de nouvelles idées et perspectives vraiment utiles lors de chaque RIM.

### Réunions hebdomadaires

#### Gazette

Chaque semaine (normalement le vendredi après-midi), l'équipe Pôle Monitoring tient une réunion (« gazette ») où le responsable du département expose les nouvelles concernant Safran et Snecma, les infos pertinentes dans le domaine du PHM et des avancements sur les projets dans lesquels la division est impliquée. Ensuite, on a tous l'opportunité de s'exprimer ou demander des informations au reste de l'équipe : le progrès sur quelque idée, des infos, l'aide pour la rédaction d'un document... Pour conclure, on fait un « tour de table » : chaque participant, stagiaires inclus, dit ce qu'il a fait pendant la semaine (assister à des conférences, réunions, finalisation des projets...) et ses collègues lui posent des questions ou proposent des idées.

Ces réunions, d'environ 2 heures de durée, ont été utiles pas seulement au niveau linguistique (j'y ai appris beaucoup de Français), mais aussi pour s'intégrer dans l'entreprise : les premières semaines je ne comprenais absolument rien à ce qu'ils se disaient, mais au cours de l'avancement du stage, j'ai commencé à connaître l'organigramme de l'entreprise, le domaine du travail de chacun, les noms et caractéristiques de chaque moteur... et c'est devenu une expérience très enrichissante.

### *Point de stage*

Toutes les semaines (normalement le mercredi matin, selon sa disponibilité), j'ai une réunion d'environ une heure avec mon tuteur de stage, Jérôme LACAÏLLE, pour suivre l'évolution de mon stage. Dans cette réunion je présente l'avancement de mes activités pour validation et je pose d'éventuelles questions où requêtes (comme l'installation de logiciel dans mon ordinateur) ; on discute des résultats trouvés et j'obtiens des corrections et directives pour continuer avec mes analyses.

Si Jérôme n'est pas disponible (il part en voyage, ou il a un autre engagement), j'ai toujours la possibilité de lui envoyer des questions ou des nouvelles par mail ou de demander un autre membre de l'équipe de m'aider. De même, si j'ai des questions urgentes ou des événements spéciaux à préparer (comme des RIMs), je peux lui demander une rencontre exceptionnelle.

### **Autres**

En sus de ces séances hebdomadaires et de mes RIMs, j'ai eu l'opportunité d'assister à différents événements : des conférences PHM, les RIMs des autres stagiaires et d'autres réunions sur divers sujets (l'informatique, des mathématiques, le développement des idées...), lesquels m'ont permis d'acquérir plus de connaissances sur différents domaines et mieux comprendre le fonctionnement interne de l'entreprise. Par ailleurs, j'ai visité les ateliers où les moteurs sont assemblés et le musée Safran, où on peut trouver l'histoire du group Safran et Snecma (voir Annexes 1 et 2) ainsi que des avions et véhicules historiques.

Également, mon tuteur et ensuite l'équipe m'ont proposé d'écrire un rapport d'étonnement pour exprimer mes impressions sur l'entreprise et proposer des changements. C'est une pratique courante, j'ai donc rédigé un rapport à mi stage, puis je l'ai envoyé au chef du Pôle Monitoring et au responsable des ressources humaines (et à mon tuteur aussi).



## Jalons académiques

Les dates clés au niveau académique pendant le stage sont présentées ci-dessous:

- Le **vendredi 8 août 2014** le tuteur académique, M. Olivier LAFITTE, a fait une visite au site de Villaroche pour suivre le correct déroulement du stage. Dans cette visite:
  - Il a vu une présentation d'environ une demi-heure avec :
    - Le sujet de stage
    - Les résultats obtenus
    - Les méthodes utilisées
    - Le travail envisagé
  - Lors de cette présentation il a posé plusieurs questions et suggéré des idées intéressantes.
  - On a parlé aussi des problématiques dans plusieurs phases de l'analyse : la captation des données, le stockage...
  - Finalement, des possibles améliorations face à la soutenance du stage à l'université et au rapport ont été proposées.
- Comme on l'a déjà cité plus haut, la date limite pour l'envoi du rapport de stage est le **dimanche 14 septembre 2014**.
- La soutenance du stage à l'université aura lieu le **jeudi 25 septembre 2014**.

## Planification du stage

Les tâches à réaliser et le planning prévisionnel présentés dans le RIM Début de stage sont les suivants :

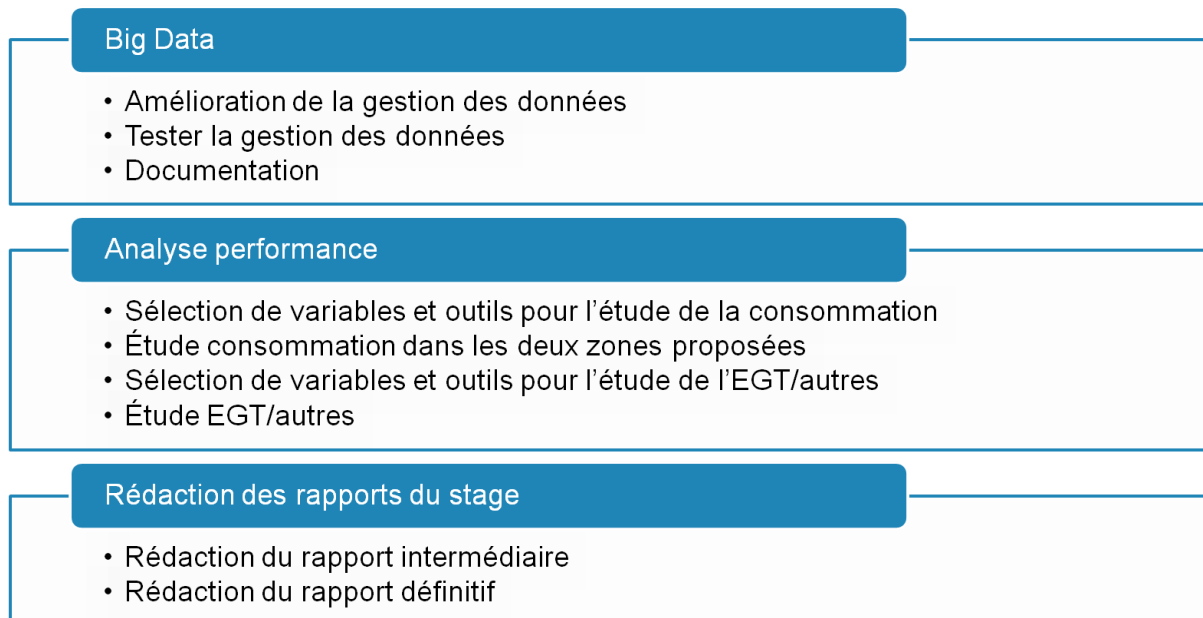
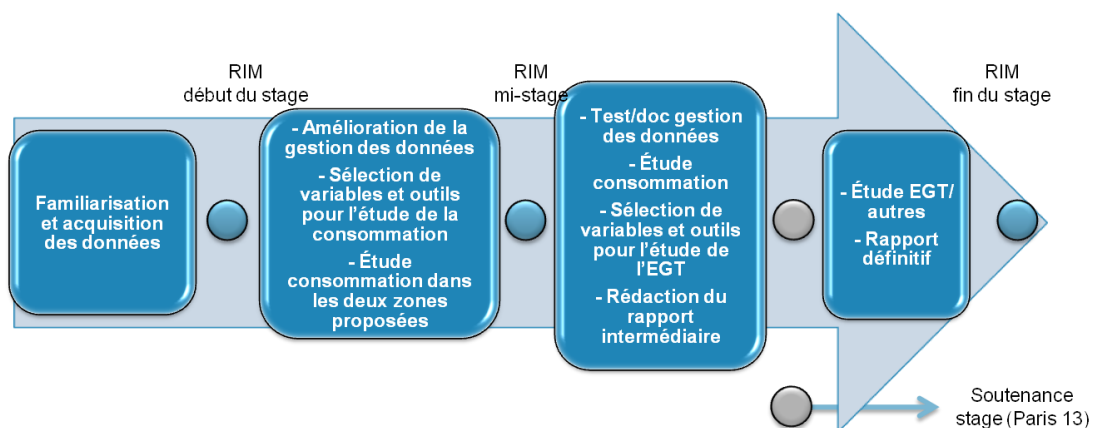


Figure 23 : Tâches à faire (20/06/2014)



Début le  
12/05/2014

Fin le  
07/11/2014

Figure 22 : Planning prévisionnel (20/06/2014)

On retrouve le planning de travail dans la page suivante :

	Mai				Juin				Juillet				Août				Septembre					Octobre					Novembre						
n° semaine		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26						
date	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24			
01_Familiarisation avec la plateforme SAMANTA																																	
02_Récupération, observation et conversion des données																																	
03_Première approche statistique à la consommation																																	
04_Préparation RIM début de stage																																	
05_RIM début de stage																																	
06_Rédaction/révision rapport intermédiaire																																	
07_Étude de la consommation																																	
08_Creation base de données																																	
09_Optimisation base de données																																	
10_Préparation présentation base de données																																	
11_Rédaction, révision et envoi du rapport d'étonnement																																	
12_Préparation visite tuteur académique																																	
13_Documentation base de données																																	
14_RIM mi-stage																																	
Soutenance à l'université																																	
RIM fin stage																																	

Date RIM Début Stage:  
20/06/2014  
Date limite envoi rapport:  
14/09/2014

Présentation BD  
24/07/2014

Visite Tuteur:  
08/08/2014

Date RIM mi-Stage:  
05/09/2014

Date soutenance:  
25/09/2014

Date RIM Fin Stage: Fin  
Novembre

 Analyse perfo / BD	 Attente validation	 Jalons Université	 RIMs Snecma	 Autres Jalons
--	--	---	---	---

# OUTILS

## Plateforme SAMANTA

La plateforme SAMANTA (Sne<sup>c</sup>ma Algorithms Maturation And Test Application) est un environnement de développement, de maturation et de test d'algorithmes Snecma qui fonctionne sous Matlab et Simulink. Elle aide au développement de solutions de surveillance (Health Monitoring) et permet la réalisation entière du cycle en V (Figure 24). En effet, elle est utilisée pour concevoir, développer et rendre matures des applications. Elle propose un accès rapide et documenté à un large panel d'algorithmes complexes de traitement des signaux et de statistiques.

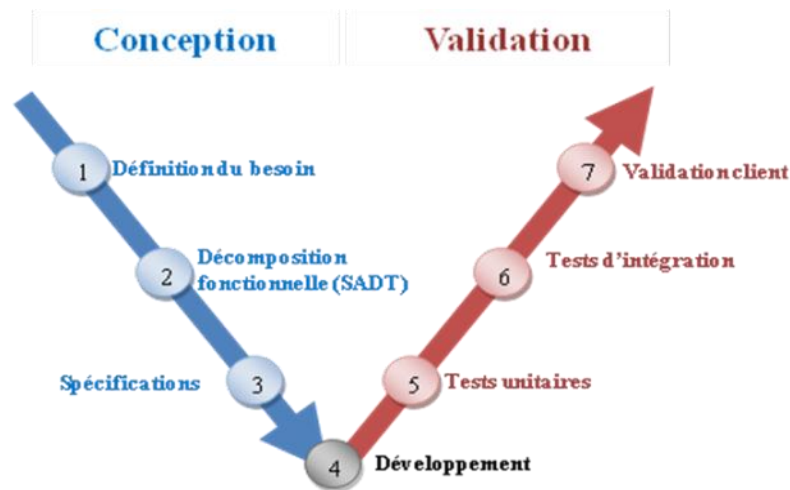


Figure 24 : Cycle de développement en V

Dans SAMANTA on trouve trois éléments pour la gestion de données et les fonctions algorithmiques :

### L'objet signal

Les algorithmes traitent des données d'entrée et produisent des résultats. Ces données sont issues de mesures ou des résultats intermédiaires produits par d'autres modules, alors il est important de définir une structure pour les contenir et formaliser de manière standard. C'est le rôle de l'objet signal.

L'objet signal peut se représenter de la manière suivante :

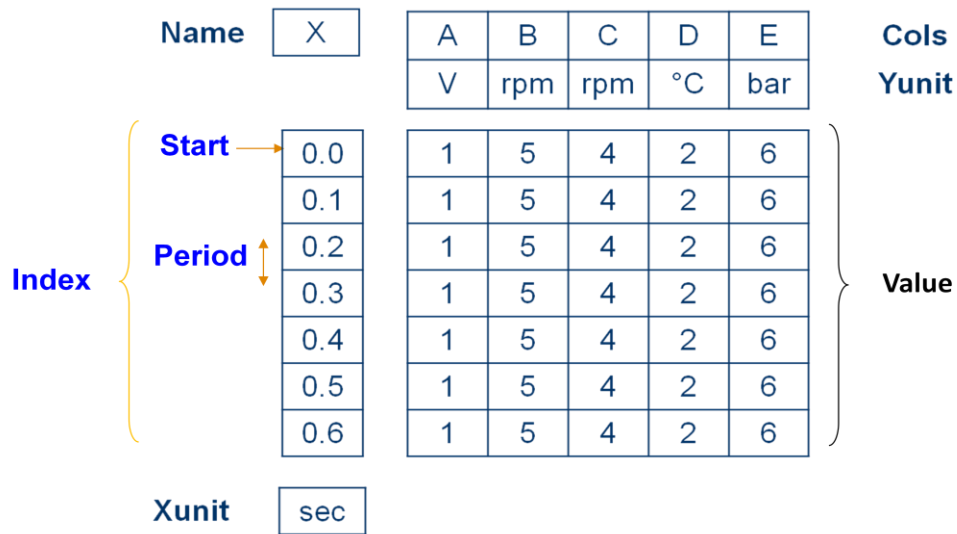


Figure 25 : Représentation d'un objet signal

Les données sont stockées dans une matrice numérique. À chaque colonne est associée un nom et une unité. Un index, généralement temporel, est associé aux données.

L'objet signal a à disposition différentes méthodes pour l'affichage et le traitement statistique de ses différents composants.

## L'objet opset

Il est toujours nécessaire de stocker des signaux dans des fichiers Matlab ou d'enregistrer la liste des signaux dans la base de données. L'objet opset définit une liste où stocker des signaux et peut être représenté par la figure suivante :

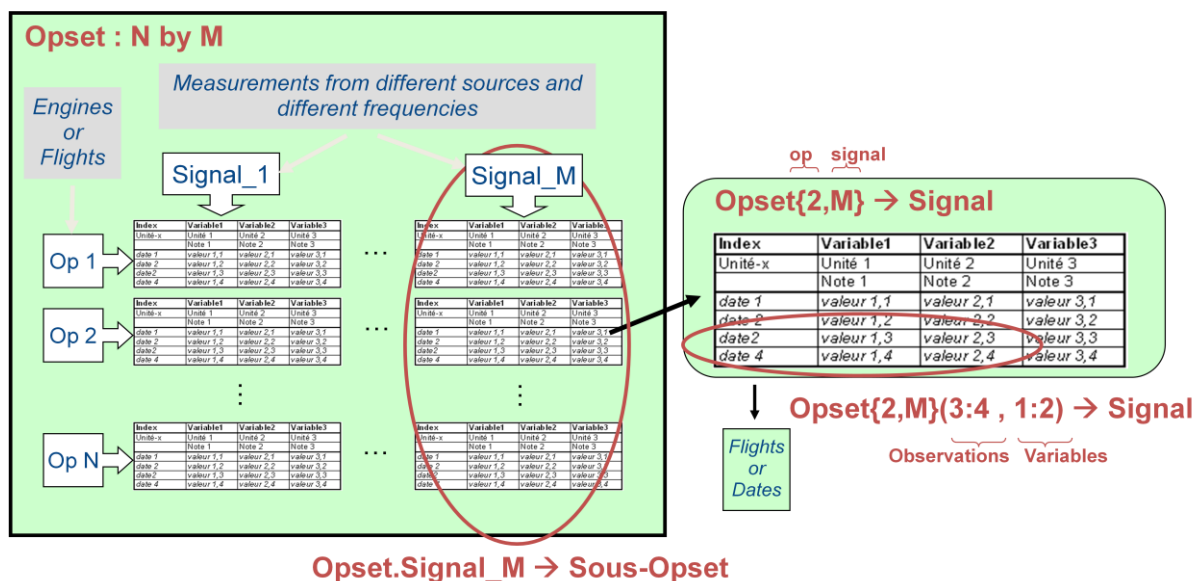


Figure 26 : Représentation d'un objet opset

Les opsets peuvent être vus comme un grand tableau où des signaux sont stockés dans des cellules. Chaque ligne fait référence à une opération spécifique tandis que chaque colonne est un port qui correspond à un signal de sortie ou d'entrée pour un module algorithmique.

À partir d'un opset, on peut extraire dans un sous-opset une liste d'opérations, un signal ou une sélection de colonnes d'un signal.

## L'objet mnode

À la différence des objets « signal » et « opset » destinés à contenir des données, l'objet mnode (abréviation de « module node ») est destiné au traitement de ces données. Il peut encapsuler n'importe quelle sorte d'algorithme, leur donnant une interface uniforme. Par conséquent il est également possible de manipuler des mnodes d'une manière standard en utilisant une interface graphique comme Simulink ou les invoquer directement comme une fonction Matlab normal.

## L'interface graphique

Les entrées et les sorties des mnodes peuvent être partagées, ce qui permet de construire des graphes de mnodes constituant des applications qu'on peut représenter plus intuitivement grâce à l'interface graphique (basée sur Simulink) de SAMANTA.

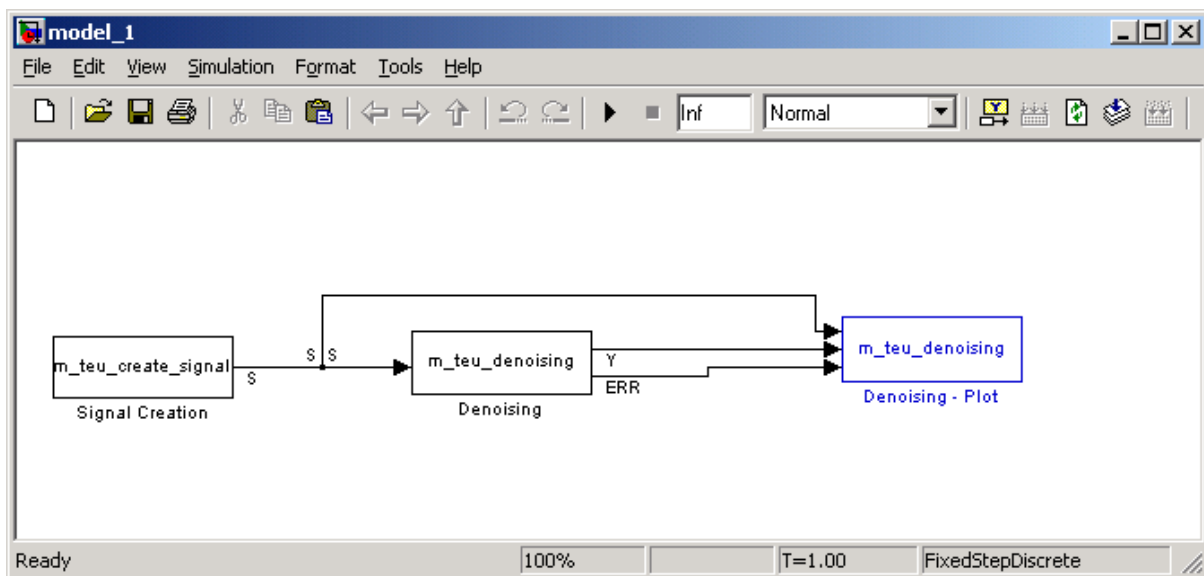


Figure 27 : Modèle SAMANTA

## Traitement de données

Pour faire l'analyse de la performance, on aura besoin de certaines informations du vol : la température, la vitesse, la quantité de carburant ... Pour les obtenir, on a à disposition plusieurs capteurs dans l'avion qui enregistrent les variables d'intérêt de chaque vol dans un fichier csv, appelé « n\_vol\_DATA.csv », y compris :

Variable	Description	Code
<b>Time</b>	Timestamp since beginning of data file	<b>Time</b>
<b>Flight_Phase</b>	Flight phase if available in data	<b>FLIGHT_PHASE</b>
<b>Longitude</b>	Longitude in degree (decimal values)	<b>LONPC</b>
<b>Latitude</b>	Latitude in degree (decimal values)	<b>LATPC</b>
<b>Altitude</b>	Altitude relative to sea in meters (integer values)	<b>ALT_STDC</b>
<b>Head</b>	Heading in degree	<b>HEAD_MAG</b>
<b>Pitch</b>	Pitch in degree	<b>PITCH</b>
<b>Roll</b>	Roll in degree	<b>ROLL</b>
<b>AoA Left</b>	Angle of Attack (Left wing) in degree	<b>AOAL</b>
<b>AoA Right</b>	Angle of Attack (Right wing) in degree	<b>AOAR</b>
<b>Aircraft speed (M)</b>	Calibrated airspeed (kts)	<b>IASC</b>
<b>True Air Speed</b>	True Air Speed (kts)	<b>TAS</b>
<b>Mach</b>	Mach (no unit)	<b>MACH</b>
<b>Ground Speed</b>	Ground speed (kts)	<b>GS</b>
<b>Gross Weight</b>	Gross Weight in Tonne	<b>GWC</b>
<b>N1 Engine1</b>	%RPM engine 1	<b>N11C</b>
<b>N1 Engine2</b>	%RPM engine 2	<b>N12C</b>
<b>N1 Engine3</b>	%RPM engine 3	<b>N13C</b>
<b>N1 Engine4</b>	%RPM engine 4	<b>N14C</b>
<b>Fuel flow 1</b>	Fuel flow engine 1 (in kg per hour)	<b>FF1C</b>
<b>Fuel flow 2</b>	Fuel flow engine 2 (in kg per hour)	<b>FF2C</b>
<b>Fuel flow 3</b>	Fuel flow engine 3 (in kg per hour)	<b>FF3C</b>
<b>Fuel flow 4</b>	Fuel flow engine 4 (in kg per hour)	<b>FF4C</b>
<b>AIE</b>	Anti Ice for Engines	<b>AIE</b>
<b>AI Wings</b>	Anti Ice for Wings	<b>AIW</b>
<b>Pack 1</b>	Air conditioning Pack 1	<b>FO_PACK_L</b>
<b>Pack 2</b>	Air conditioning Pack 2	<b>FO_PACK_R</b>
<b>APU On</b>	APU is on or not (boolean value)	<b>APU_ON</b>
<b>Fuel flow APU</b>	Fuel flow of APU in Kg per Hour	<b>FF_APUC</b>
<b>Fuel burn</b>	Fuel burnt since start (in tonne)	<b>FBURN_TON</b>
<b>Fuel Quantity</b>	Quantity of fuel in tank	<b>FQTY_TON</b>
<b>Flap</b>	Average flap value (degree)	<b>FLAPC</b>
<b>Slat</b>	Average slat value (degree)	<b>SLATC</b>
<b>Gear Down Locked</b>	Gear down and on the runway	<b>LDG_SELDW</b>
<b>TAT</b>	True Air Temperature (degree)	<b>TAT</b>
<b>Wind Direction</b>	Wind direction (degree)	<b>WIN_DIR</b>
<b>Wind Speed</b>	Wind speed (kts)	<b>WIN_SPD</b>

<b>ILS Approach</b>	Type of ILS Approach	FO_ILS_CAT
<b>Auto pilot status</b>	Whether autopilot is engaged or not	AP_EGD
<b>Auto throttle status</b>	Whether autothrottle (or autothrust depending on FMS) is engaged or not	ATS_EGD
<b>is Mach selected</b>	Whether speed is controlled in Mach or CAS	IAS_DISP_R
<b>Mach target</b>	Mach speed target of the Autopilot	FO_AP_MACH_TGT
<b>Cas target</b>	CAS speed target of the Autopilot (in kts)	FO_AP_IAS_TGT
<b>N1 Target1</b>	N1 target for engine 1	N1_TGT1
<b>N1 Target2</b>	N1 target for engine 2	N1_TGT2
<b>N1 Target3</b>	N1 target for engine 3	N1_TGT3
<b>N1 Target4</b>	N1 target for engine 4	N1_TGT4
<b>Auto throttle mode</b>	Mode of the autothrottle	FO_AT_MODE
<b>Vnav mode</b>	VNAV (Vertical Navigation) mode of the FMS	FO_PITCH_MODE
<b>Lnav mode</b>	LNAV (Lateral Navigation) mode of the FMS	FO_ROLL_MODE
<b>isAirborne</b>	If the aircraft is on the ground or airborne	AIR_GND
<b>Throttle Resolver Angle Engine1</b>	Throttle Resolver Angle Engine1	TLA1R
<b>Throttle Resolver Angle Engine2</b>	Throttle Resolver Angle Engine2	TLA2R
<b>Throttle Resolver Angle Engine3</b>	Throttle Resolver Angle Engine3	TLA3R
<b>Throttle Resolver Angle Engine4</b>	Throttle Resolver Angle Engine4	TLA3R
<b>N2 Engine1</b>	N2 Engine1	N21C
<b>N2 Engine2</b>	N2 Engine2	N22C
<b>N2 Engine3</b>	N2 Engine3	N23C
<b>N2 Engine4</b>	N2 Engine4	N24C
<b>Thrust Reverser Deployed Engine 1</b>	Thrust Reverser Deployed Engine 1	TR_DPL_L
<b>Thrust Reverser Deployed Engine 2</b>	Thrust Reverser Deployed Engine 2	TR_DPL_R
<b>Thrust Reverser Deployed Engine 3</b>	Thrust Reverser Deployed Engine 3	TR_DPL_3
<b>Thrust Reverser Deployed Engine 4</b>	Thrust Reverser Deployed Engine 4	TR_DPL_4
<b>Auto brake status</b>	Auto brake status	AUTO_BRK
<b>Brake Pressure Main Left</b>	Brake Pressure Main Left	BRK_PRS_L
<b>Brake Pressure Main Right</b>	Brake Pressure Main Right	BRK_PRS_R
<b>Flight_Phase X</b>	Flight_Phase X	FO_FLT_PHSE
<b>Selected EGT Engine 1</b>	Selected Exhaust Gaz Temperature Engine 1	EGT1C
<b>Selected EGT Engine 2</b>	Selected Exhaust Gaz Temperature Engine 2	EGT2C
<b>Selected Fuel Metering Valve Position Engine 1</b>	Selected Fuel Metering Valve Position Engine 1	FMV_POS_SL_1
<b>Selected Fuel Metering Valve Position Engine 2</b>	Selected Fuel Metering Valve Position Engine 2	FMV_POS_SL_2
<b>Engine 1 Cutoff</b>	Engine 1 Cutoff	ENG1_CUTOFF
<b>Engine 2 Cutoff</b>	Engine 2 Cutoff	ENG2_CUTOFF

Tableau 3 : Variables dans le fichier n\_vol\_DATA.csv



Les variables en rouge ne seront pas utilisées (les avions étudiés n'ont que deux moteurs, alors ces variables seront toujours zéro) ; les bleus, seront utilisés pour l'analyse de la performance. Toutefois, tous les variables seront enregistrés dans la base de données, même si elles ne sont pas utiles pour l'instant (peut-être on aura besoin pour des études postérieurs ou pour autres types d'avions).

On a aussi l'information non-technique ou administrative du vol, disponible dans un autre fichier csv :

Variable	Code
Departure Date	DATE_OUT
Departure Time	TIME_OUT
Flight Num 1	FLIGHT_NO1
Flight Num 2	FLIGHT_NO2
Origin	ORIGIN
Runway To	RUNWAY_TO
Destination	DESTINATION
Runway Ld	RUNWAY_LD
Flight Type	FLIGHT_TYPE

Tableau 4 : Variables dans le deuxième fichier csv

Pour pouvoir travailler en SAMANTA avec ces données, il faut faire une conversion en opset. Tous les fonctions du modèle sont déjà créés:



Figure 28 : Modèle Simulink/SAMANTA pour la traduction csv/opset

On obtient un opset comme celui-ci (Figure 29), avec 78 variables et une structure « Flight » avec les données non-techniques.

```

data = opset

[1] Y (78): FLIGHT_PHASE LONPC LATPC ALT_STDC HEAD_MAG PITCH ROLL AOAL AOAR IASC TAS MACH GS
GWC N11C N12C N13C N14C FF1C FF2C FF3C FF4C AIE AIW FO_PACK_L FO_PACK_R APU_ON
FF_APUC FBURN_TON FQTY_TON FLAPC SLATC LDG_SELDW TAT WIN_DIR WIN_SPD FO_ILS_CAT
AP_EGD ATS_EGD IAS_DISP_R FO_AP_MACH_TGT FO_AP_IAS_TGT N1_TGT1 N1_TGT2 N1_TGT3
N1_TGT4 FO_AT_MODE FO_PITCH_MODE FO_ROLL_MODE AIR_GND TLA1R TLA2R TLA3R TLA4R N21C
N22C N23C N24C TR_DPL_L TR_DPL_R TR_DPL_3 TR_DPL_4 AUTO_BRK BRK_PRS_L BRK_PRS_R
FO_FLT_PHSE EGT1C EGT2C FMV_POS_SL_1 FMV_POS_SL_2 ENG1_CUTOFF ENG2_CUTOFF FQTY1
FQTY2 FQTY3 FQTY_AUX TIME_R DATE_R
  
```

Figure 29 : Opset d'un avion (D)

Ce format est utile si on a besoin de traiter toutes les données au même temps, mais il est trop lourd s'il s'agit d'accès temporaire et pas efficace pour la recherche d'infos concrètes : on n'utilisera pas la plupart de variables, donc on voudrait pouvoir choisir dans chaque analyse les variables à retenir. On voudrait alors un système de stockage et sélection plus efficace et d'accès facile et rapide : une vraie base de données.

## SQLite

### L'outil

SQLite est une bibliothèque écrite en C qui propose un moteur de base de données relationnelle accessible par le langage SQL. On l'utilisera pour créer et gérer la base de données.

Contrairement aux serveurs de bases de données traditionnels, comme MySQL ou PostgreSQL, sa particularité est de ne pas reproduire le schéma habituel client-serveur mais d'être directement intégrée aux programmes. L'intégralité de la base de données (déclarations, tables, index et données) est stockée dans un fichier indépendant de la plateforme.

SQLite est utilisé dans beaucoup d'applications, y compris : Adobe Photoshop Elements, Mozilla Firefox, Opera, Skype, XBMC Media Center ("XBox Media Center"). Grâce à sa petite taille, il est aussi présent dans des systèmes comme Android, BlackBerry, Windows Phone, Apple ou Symbian.

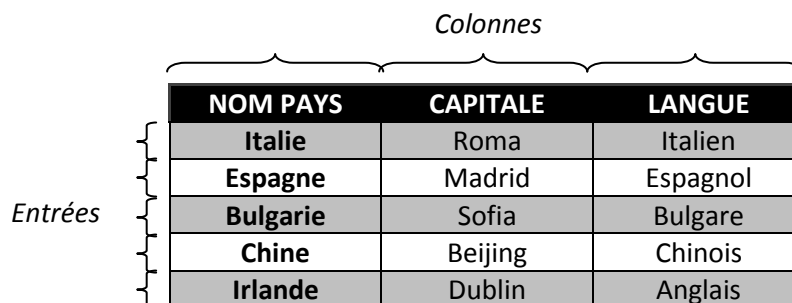
### Composantes

Concrètement, pour le stage on a utilisé la version 3, avec les caractéristiques suivantes :

- Pas de format spécial pour les dates en format Matlab (donc on utilisera TEXT).
- Pas de possibilité d'enregistrer des vecteurs (on verra des solutions ultérieurement).

Ci-dessous, quelques termes SQLite et explications générales sur les bases de données relationnelles :

- Une base de données relationnelle est composée par **tables** et par des relations entre elles. Dans une table on a différentes colonnes, pour des variables ou caractéristiques de chaque entrée de la table. Exemple (table « Pays »):



The diagram shows a table with three columns and five rows. A bracket above the columns is labeled 'Colonnes' and a bracket to the left of the rows is labeled 'Entrées'.

NOM PAYS	CAPITALE	LANGUE
Italie	Roma	Italien
Espagne	Madrid	Espagnol
Bulgarie	Sofia	Bulgare
Chine	Beijing	Chinois
Irlande	Dublin	Anglais

Figure 30 : Exemple table

- Une **Primary Key** est une colonne identificatrice et unique pour chaque entrée (dans le cas de une table de personnes, ce pourrait être par exemple le numéro du passeport). C'est utile pour ne pas répéter des entrées et pour faire une recherche plus efficace.
- Une **Foreign Key** est une manière de faire des relations entre des tables. Imaginez que l'on ait une table « Ville » avec des noms de villes et les noms de pays (par exemple Barcelone-Espagne), et que l'on veuille connaître la capitale du pays de chaque ville : on doit demander « quel est le contenu de la colonne CAPITAL de la table Pays pour l'entrée où le NOM PAYS est le même que le NOM PAYS de l'entrée Barcelone dans la table Ville? ». Dans ce cas, la colonne Pays dans la table « Ville » est une Foreign Key liée à la table « Pays » et la réponse à l'exemple est « Madrid ».
- Un **Index** est une structure de données utilisée et entretenue par la base de données pour lui permettre de retrouver rapidement les données. L'utilisation d'un index simplifie et accélère les opérations de recherche, de tri, de jointure ou d'agrégation.
- Un **Trigger** est un déclencheur, un morceau de code qui s'exécute sous des conditions déterminées.

## Algorithme de normalisation

### Fonctionnement de normctx

L'algorithme du module **normctx**, appelé aussi CRN (Lacaille, 2009) normalise des observations qui ont été acquises sous le même contexte et dans les mêmes conditions. Les étapes principales de l'algorithme sont résumées dans la Figure 31.

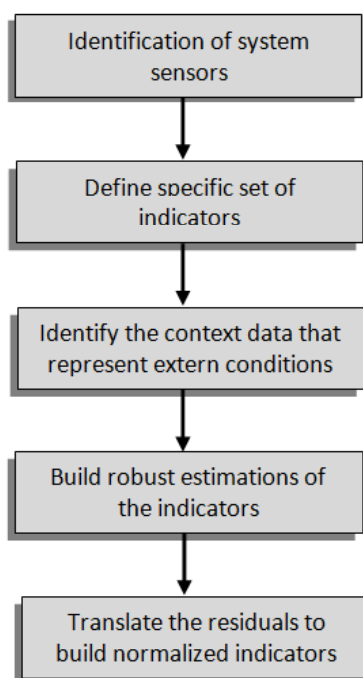


Figure 31 : Étapes de l'algo CRN

Nous possédons des données brutes acquises à l'aide de différents capteurs, comme des pressions, des températures ou des flux. Grâce à leurs données, les experts fabriquent différents indicateurs.

Les indicateurs dépendent du contexte mais il existe aussi des relations entre eux. On ne peut donc pas supprimer le contexte indicateur par indicateur parce qu'on perdrait l'information sur leurs relations. Il est assez difficile de construire des indicateurs indépendants.

La procédure suivante permet de supprimer les dépendances au contexte sans dégrader les relations entre les indicateurs.

Pour chacun d'eux, on va établir une estimation grâce à une régression sur les autres indicateurs et le contexte, sachant que les relations entre ceux-ci et le contexte ne sont pas vraiment linéaires.

Soit  $Y = (y_1, \dots, y_m)$  le vecteur de tous les indicateurs et  $X$  le vecteur des données de contexte. Pour chaque indicateurs  $j$  entre 1 et  $m$ , on note  $Y^{(j)}$  tous les indicateurs sauf le  $j^{\text{ème}}$ . On définit l'espace engendré  $E^{(j)} = \sigma(Y^{(j)}, X)$  construit à partir de fonctions du contexte  $X$  et des autres indicateurs  $Y$  (excepté  $y_j$ ). On projette alors  $y_j$  dans  $E^{(j)}$  par une méthode de régression mathématique. Il pourrait s'agir d'une régression linéaire ou un modèle de réseau de neurones. Le résultat  $\hat{y}_j$  est alors une estimation robuste de  $y_j$  prenant le contexte et les relations interdépendantes en compte.

Une fois cette estimation calculée, on obtient alors les observations normalisées  $\tilde{y}_j = \bar{y}_j + (y_j - \hat{y}_j)$  qu'on construit à partir de la différence entre les vraies observations et les valeurs prédites. Le résultat est réajusté à la moyenne.

De cette façon, si tout est normal, la différence entre les estimations et les valeurs cibles reste faible et le signal reste proche de la moyenne.

## Exemple d'utilisation

En suite, on montre un possible résultat de ce module :

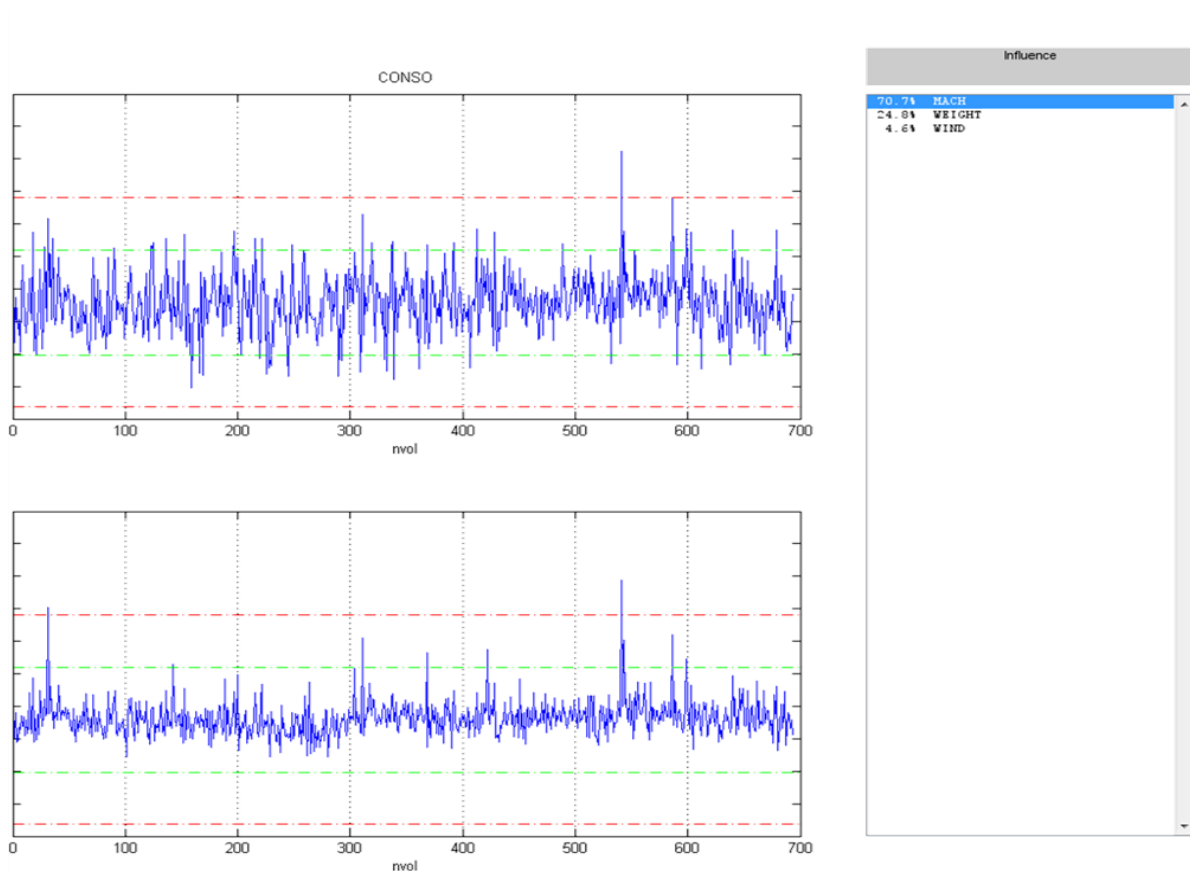


Figure 32 : Sortie de normctx

Dans cet exemple on a introduit la consommation (CONSO) comme variable endogène et le poids (WEIGHT), la vitesse du vent (WIND) et la vitesse MACH (MACH) comme des variables exogènes.

La partie à droite, intitulée « Influence », collecte les pourcentages d'influence sur la variable endogène attribués par l'algorithme pour chacune des variables exogènes introduites en tant que paramètre.

À gauche on retrouve les résultats graphiques. Dans le graphe supérieur on a la courbe originale de la consommation par rapport au numéro de vols. Dessous, l'algo montre des résultats qu'il ne peut pas expliquer avec les pourcentages d'influence exprimés à droite.

L'algorithme retourne aussi des résultats numériques pour mesurer l'adéquation entre les pourcentages et les données originales .

```
ans = mnode(Normctx:m_normctx - version 1.2)
adaptable
| MQV = 0.767722
| 1 input, 1 output, 5 parameters.
input 1 = signal numeric (op:0) 1-by-1 = 4
| properties:
|   Name: XY
|   Cols: CONSO,WEIGHT,MACH,WIND
output 1 = signal numeric (op:0) 1-by-1 = 1
| properties:
|   Name: Z
|   Cols: CONSO
|   Yunit: -
|   Xunit: nvol
3 contextual parameters
Regressions of 1 input variables:
- Acceptable residuals = 5.0%
- Minimal adjusted R2   = 0.767722 (MQV)
- Maximal adjusted R2   = 0.767722
Output normal conditions:
- CONSO = 0.379113 +/- 0.131663
```

**Figure 33 : Résultats d'adéquation**

Parmi ces informations on trouve le coefficient de détermination ( $R^2$ ), indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire ; toujours d'une valeur comprise entre 0 et 1, il est un outil très intéressant pour mesurer l'adéquation entre le modèle et les données observées.

Grace à ces calculs on peut décider si le rang d'influences données est vraiment fiable ou s'on doit essayer avec des autres paramètres. L'algorithme de normalisation devient alors un outil efficace pour les futures analyses de la performance.

# RÉSULTATS

## Première approche à la consommation : zone du climb

Pour cette première analyse, on va travailler sur la zone du climb (entre 10000 et 30000 pieds) et on va essayer à voir intuitivement la relation entre la consommation et 3 variables :

- Le poids de l'avion (au début de la zone du climb, à 10000 pieds).
- La vitesse MACH (moyenne dans la zone du climb).
- La vitesse du vent (moyenne dans la zone du climb).

### Moteur 1 – Avion A

Pour le moteur numéro 1 de l'avion A (251 vols<sup>1</sup>), on obtient les graphiques suivants (Figure 34) par rapport à chaque vol. On a signalé les zones les plus similaires entre chaque graphe et la courbe consommation ; dans le cas du vent, les zones vertes représentent aussi les parties qui semblent « inversées ». On a enlevé aussi un des vols, car c'était clairement un outlier (valeur extrême).

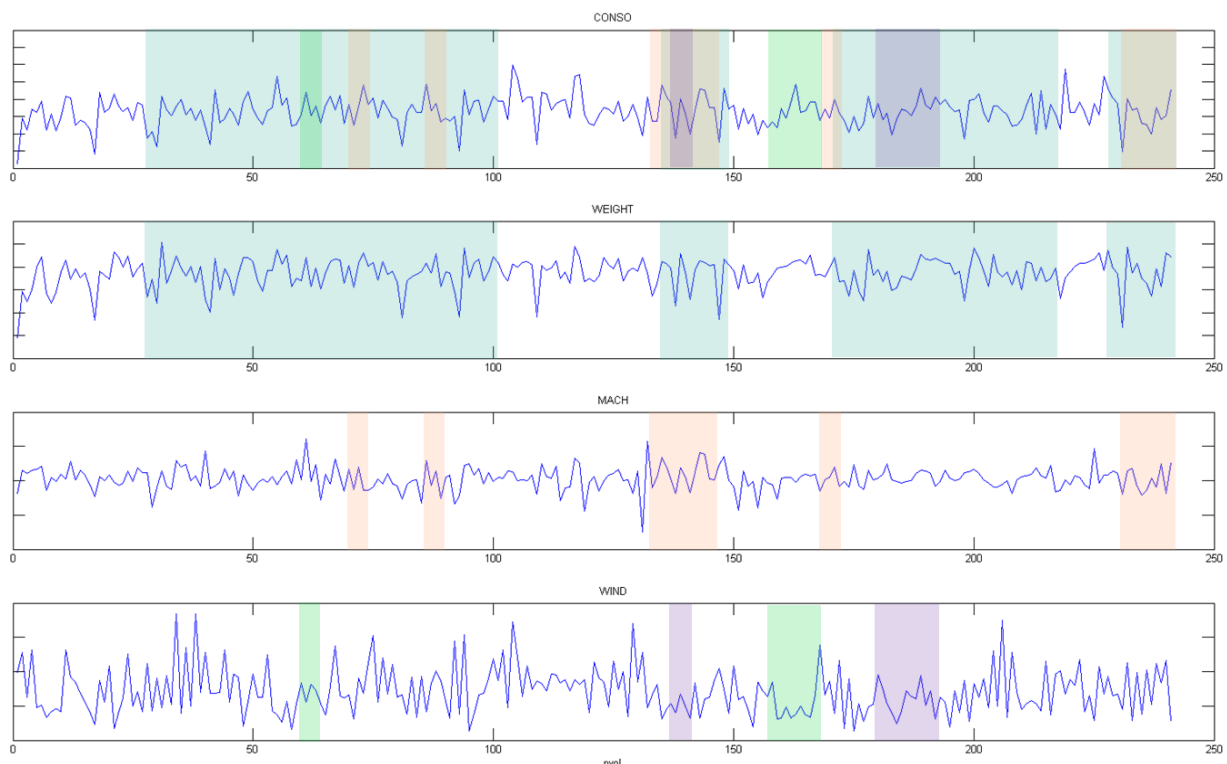


Figure 34 : Première approche

<sup>1</sup> On note que la quantité de vols est inférieure à celle indiquée dans le Tableau 1 : c'est dû au filtrage des vols qui ne dépassent pas 30000 pieds.

De prime abord, le poids paraît comme la variable la plus explicative, suivie par la vitesse MACH. Mais si on invoque l'algorithme de normalisation, on obtiens des résultats suivants (avec des bons paramètres R2) :

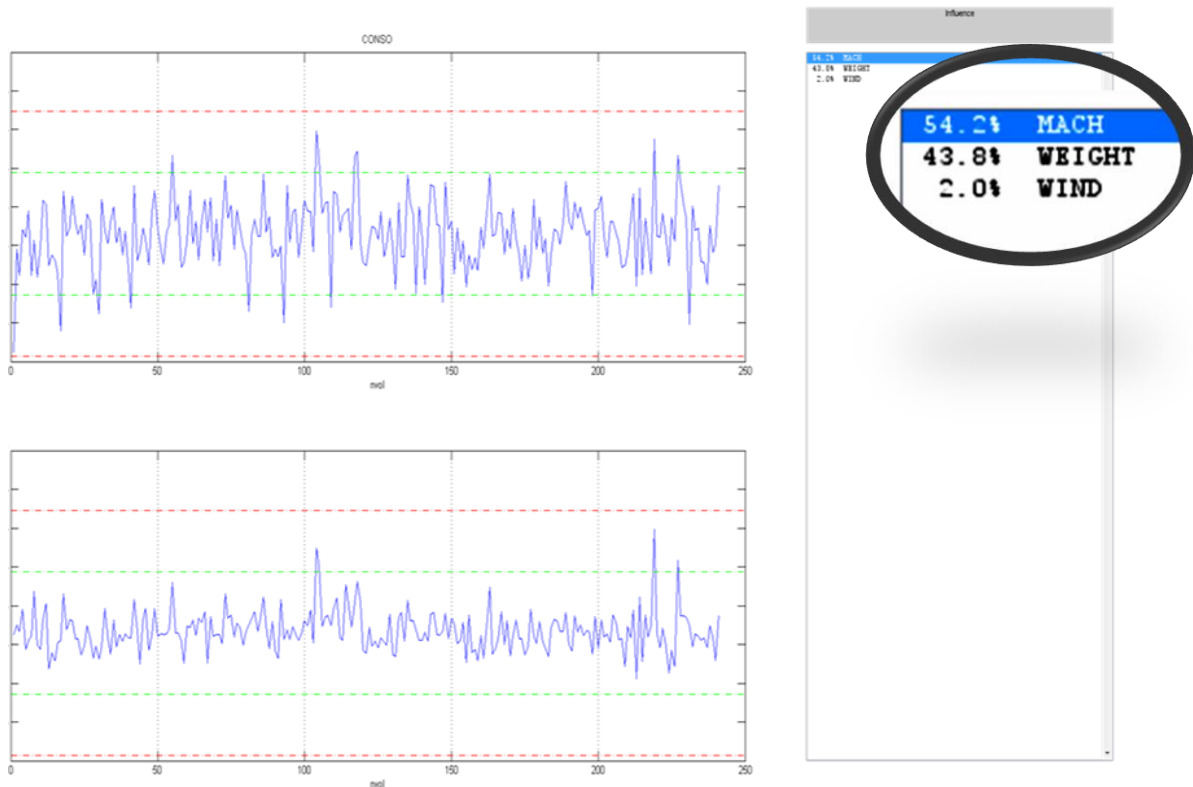


Figure 35 : Normalisation

Selon la normalisation, la vitesse MACH est plus influente que le poids, et le vent a très peu d'influence. On va donc se focaliser sur ces deux premières variables ; on va étudier la régression linéaire (l'algorithme de normalisation n'utilise pas juste un modèle linéaire) :

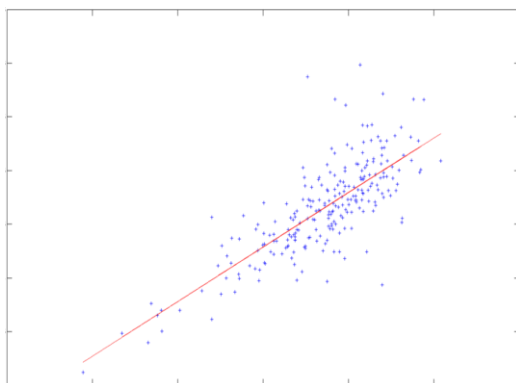


Figure 37 : Régression Consommation (Y) –Poids (X)

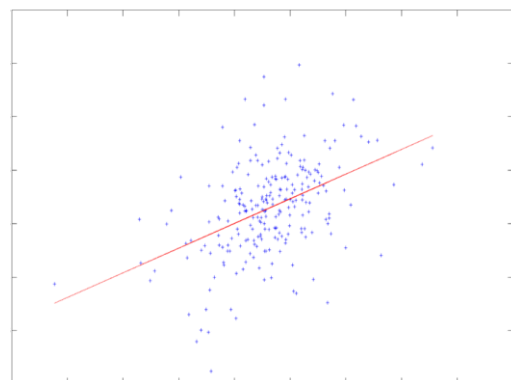


Figure 36 : Régression Consommation (Y) –MACH (X)

D'après ces figures, on note que dans le cas du poids l'ajustement est vraiment fort (en dehors des petites outliers dans le coin supérieur droit) et que dans le cas du MACH le grand groupe de vols a la forme d'un disque (pas de vraie tendance linéaire).

Si on regarde aussi les coefficients de corrélation entre la consommation et chacune des variables analysées, on trouve les résultats suivants :

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.7746	0.4403	0.0540
POIDS	0.7746	1.0000	0.3190	0.0530
MACH	0.4403	0.3190	1.0000	-0.0752
VENT	0.0540	0.0530	-0.0752	1.0000

Tableau 5 : Coefficients de corrélation

Le poids a la corrélation la plus forte (0.7746), tandis que le coefficient pour la vitesse MACH n'est pas indicatif (0.4403) et la vitesse du vent est négligeable (0.0540).

On cherche d'abord à vérifier si ces résultats sont similaires pour les huit moteurs dont on dispose..

## Comparaison globale

Pour les coefficients de corrélation, on retrouve effectivement des résultats très équivalents :

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.6984	0.4762	0.0296
POIDS	0.6984	1.0000	0.3822	-0.0037
MACH	0.4762	0.3822	1.0000	0.0023
VENT	0.0296	-0.0037	0.0023	1.0000

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.7096	0.4636	-0.0285
POIDS	0.7096	1.0000	0.3273	0.0378
MACH	0.4636	0.3273	1.0000	0.0191
VENT	-0.0285	0.0378	0.0191	1.0000

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.7536	0.4994	-0.0169
POIDS	0.7536	1.0000	0.3988	0.0354
MACH	0.4994	0.3988	1.0000	0.0338
VENT	-0.0169	0.0354	0.0338	1.0000

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.7035	0.4511	0.0857
POIDS	0.7035	1.0000	0.3206	0.0557
MACH	0.4511	0.3206	1.0000	-0.0627
VENT	0.0857	0.0557	-0.0627	1.0000

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.6988	0.4776	0.0252
POIDS	0.6988	1.0000	0.3822	-0.0037
MACH	0.4776	0.3822	1.0000	0.0023
VENT	0.0252	-0.0037	0.0023	1.0000

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.7073	0.4614	-0.0300
POIDS	0.7073	1.0000	0.3273	0.0378
MACH	0.4614	0.3273	1.0000	0.0191
VENT	-0.0300	0.0378	0.0191	1.0000

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.7525	0.4979	-0.0196
POIDS	0.7525	1.0000	0.3988	0.0354
MACH	0.4979	0.3988	1.0000	0.0338
VENT	-0.0196	0.0354	0.0338	1.0000

	CONSO	POIDS	MACH	VENT
CONSO	1.0000	0.7031	0.4510	0.0852
POIDS	0.7031	1.0000	0.3206	0.0557
MACH	0.4510	0.3206	1.0000	-0.0627
VENT	0.0852	0.0557	-0.0627	1.0000

Var	Moyenne	Intervalle
POIDS	0.7158	0.6984 - 0.7536
MACH	0.4723	0.4510 - 0.4994
VENT	0.0163	-0.0300 - 0.0857

Tableau 6 : Comparaison des coefficients de corrélation

D'où on peut conclure que le poids est la variable la plus représentative.



Plus visuellement, si on regarde la consommation de tous les vols en même temps par rapport aux autres variables (en abscisse), on obtient les graphiques suivantes :

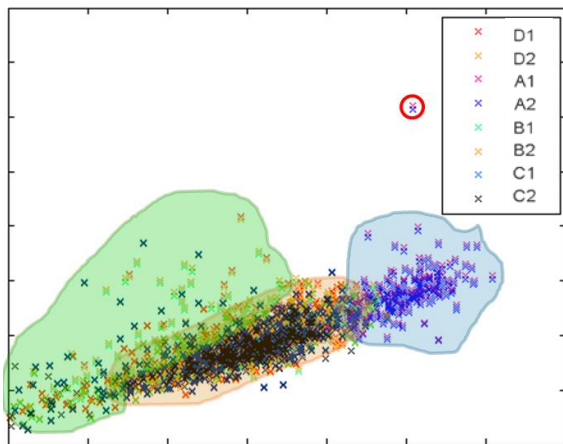


Figure 38 : Poids (X) – Consommation (Y)

Dans le cas du poids (Figure 38), on trouve deux grands clusters très bien définis : l'un pour les vols des deux moteurs de l'avion A (signalé en bleu) et l'autre avec la plupart des autres vols (en orange). Il y a aussi un vol très séparé des autres, marqué en rouge, (l'outlier qu'on a enlevé avant pour le moteur 1 de l'avion A) et un groupe dispersé de points qui pourrait représenter un troisième cluster (en vert) mais, comme on verra après, il apparaît seulement avec le poids : ce cluster n'existe pas dans les affichages des autres

variables. Dans des études postérieures on essaiera de comprendre les raisons pour lesquelles l'outlier éloigné et les points dispersés sont particuliers.

Pour la vitesse MACH (Figure 39), on voit une autre fois les deux grands groupes précédents, mais le troisième a disparu. Quelques points de l'ancien essai de cluster vert ont rejoint le cluster orange; des autres ont resté comme des points séparés sans relation apparente : peut-être la raison de cet événement d'isolement est liée à des autres variables ou simplement il a des conditions de contexte différents auxquels on n'a pas accès pour l'analyse (le aspect météo, par exemple).

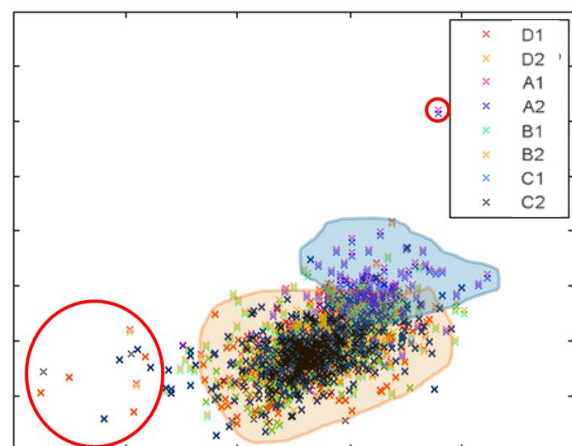


Figure 39 : MACH (X) – Consommation (Y)

Finalement, en ce qui concerne le vent (Figure 40), l'outlier et les deux grands groupes sont encore présents, mais avec une distribution notablement différente des affichages antérieurs (Figure 41).

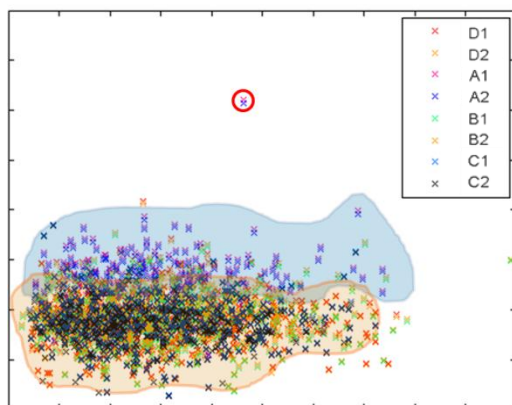


Figure 40 : Vent (X) – Consommation (Y)

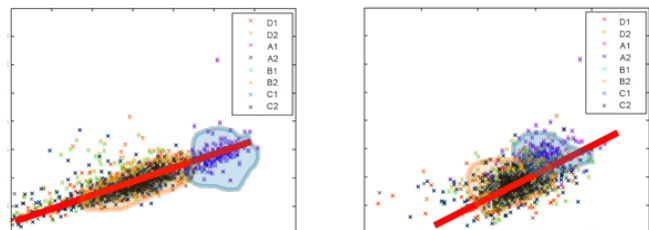


Figure 41 : Tendances du poids (à droite) et MACH (à gauche)

On ne peut que conclure de cette première analyse que les vols de l'avion A sont très différents des autres, et essayer découvrir les raisons pour répondre aux questions que l'on vient de se poser.

## Feedback de la RIM Début du stage

Après avoir présenté, entre autres, les résultats de cette première approche, j'ai reçu des réactions, idées et suggestions pour continuer avec l'analyse:

- Étudier des aspects de la qualité du carburant, comme la quantité d'eau ou l'origine du carburant, et la prise en compte des dates clés pour la maintenance des moteurs, comme les nettoyages des injecteurs ou la dernière endoscopie.
- Étudier et affiner des aspects physiques, concrètement :
  - o Prendre la vitesse du vent au carré.
  - o Observer la température de l'air.
  - o Ajouter la direction du vent à l'analyse du vent.
- Étude de l'influence des consignes de take-off (mesurer le temps pour la phase du climb).

## Étude de la consommation

### Variables

Premièrement, on regarde des nouvelles variables proposées : la température ambiante et la vitesse du vent au carré en combinaison avec sa direction. On obtient des résultats pas très prometteurs, comme on peut voir dans (Figure 42) : les graphiques ne sont pas du tout similaires.

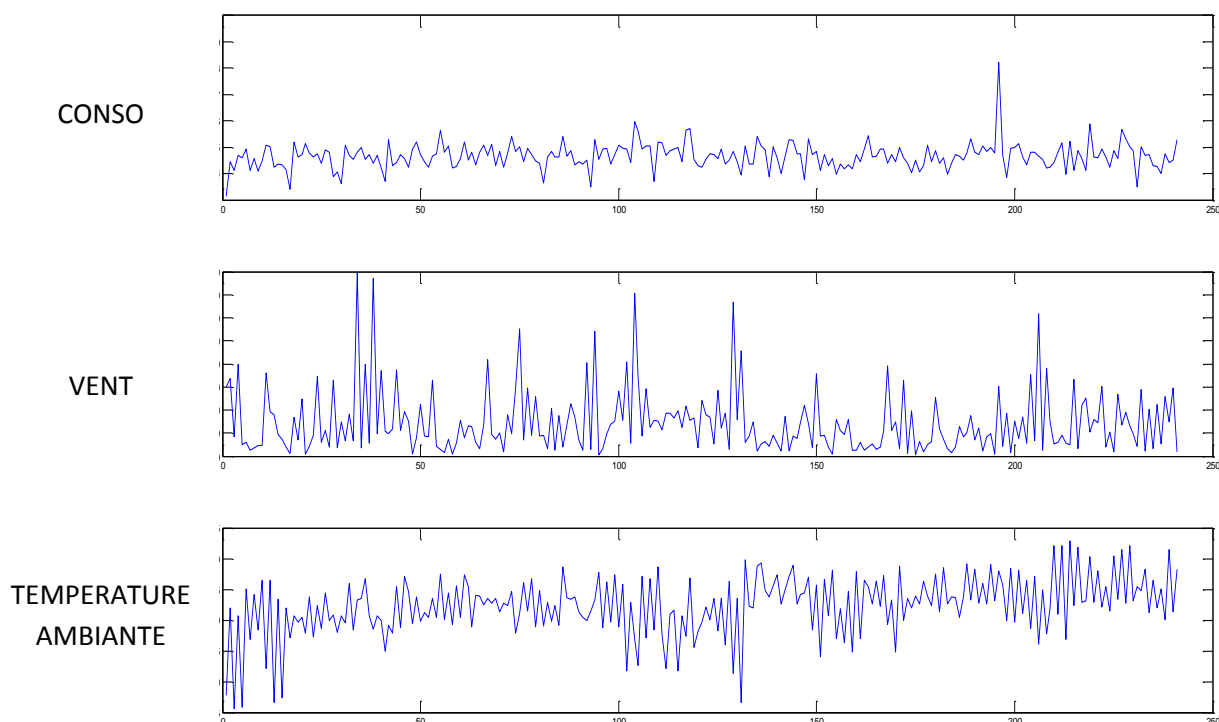


Figure 42 : Avion A, moteur 2

Dans le cas de la normalisation, on a eu des aboutissements suivants (Figure 43), avec des pourcentages d'influence vraiment faibles pour la température et le vent (qui a directement pas d'influence), donc apparemment les nouvelles variables et calculs ne sont pas très influentes.

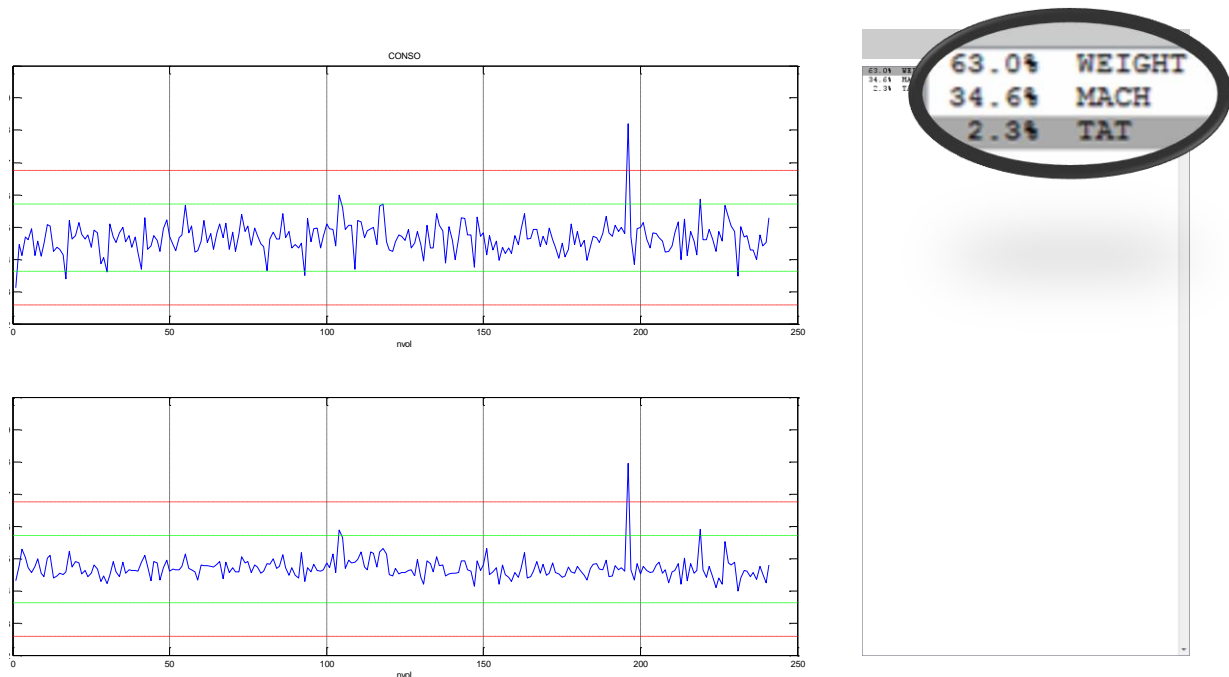


Figure 43 : Normalisation de l'avion A moteur 2

On peut vérifier ces résultats en regardant les bas coefficients de corrélation de la consommation des deux moteurs de chaque avion par rapport aux nouvelles variables dans le Tableau 7 :

	A - M1	A - M2	B - M1	B - M2	C - M1	C - M2	D - M1	D - M2
TAT	0.2132	0.2149	0.1359	0.1441	0.2333	0.2377	0.1599	0.1666
VENT L	0.0950	0.0944	0.0433	0.0386	-0.0029	-0.0047	-0.0323	-0.0348
VENT F	0.0761	0.0769	0.0165	0.0172	-0.0598	-0.0597	0.0121	0.0128

Tableau 7 : Coefficients de corrélation pour la température (TAT) et le vent (de face ou latéral)

## Nouveau indicateur : $\Delta t$ décollage

On voudrait observer un nouvel indicateur de la performance pour compléter l'étude de la consommation : le temps que prend l'avion pour passer de 10000 à 30000 pieds (on va l'appeler  $\Delta t$ ).

La régression par rapport au poids montre deux groupes qui ne suivent pas la tendance générale des vols. Postérieurement on fera la comparaison avec des clusters antérieurs.

Si on obtient des résultats significatives, on fera la même évaluation avec la vitesse MACH.

Pour cette deuxième étape de l'analyse, mon tuteur me propose aussi des nouvelles visualisation pour montrer les résultats, comme on verra ci-dessous.

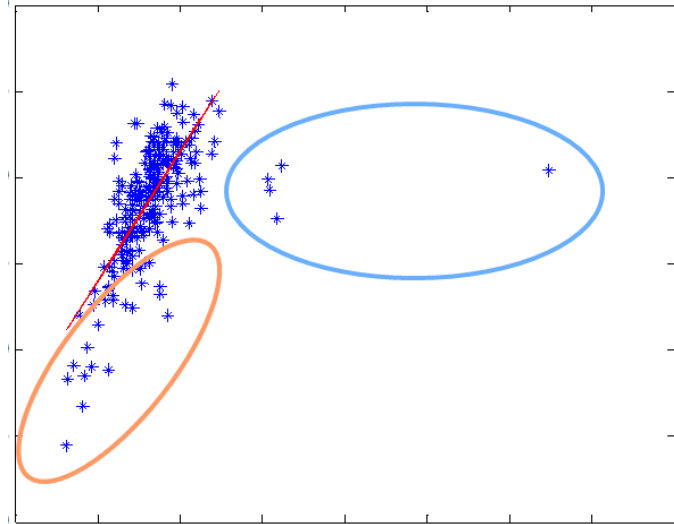


Figure 44 : Régression  $\Delta t$  (X) – Poids (Y)

## Nouvelles visualisations

*Boxplot (boîte à moustache)*

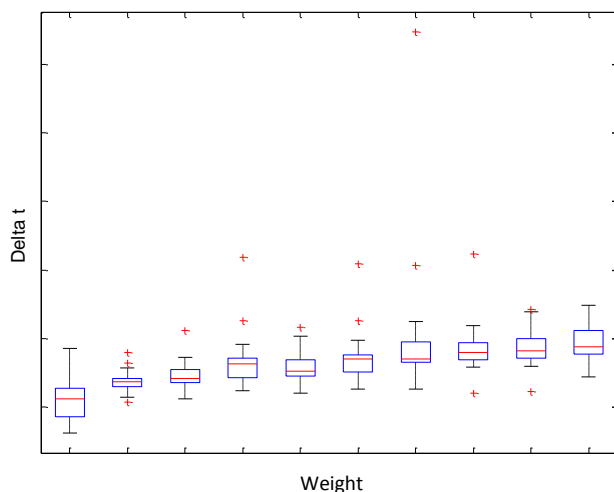


Figure 45 : Boxplot  $\Delta t$  (Y) – Poids (X) - Taille fixe (10)

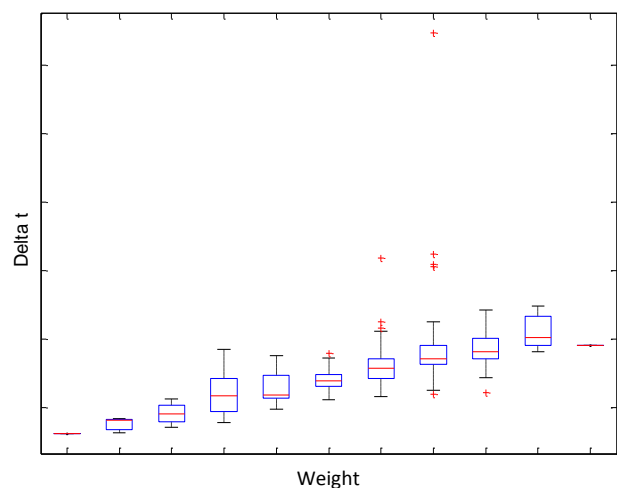


Figure 46 : Boxplot  $\Delta t$  (Y) – Poids (X) - Taille constante

Parmi ces nouvelles visualisations on peut utiliser des boîtes à moustache. Deux manières différentes de regrouper les boîtes sont proposées :

- Dans (Figure 45) on trie les vols selon leurs poids et on prend toujours des boîtes de successives de 10 tonnes de largeur.
- Une autre option (Figure 46) : on divise l'intervalle entre le poids minimum et le maximum en 10 morceaux.

On retrouve des outliers (points rouges), à comparer avec ces qu'on avait déjà à analyser.

### Fenêtre glissante

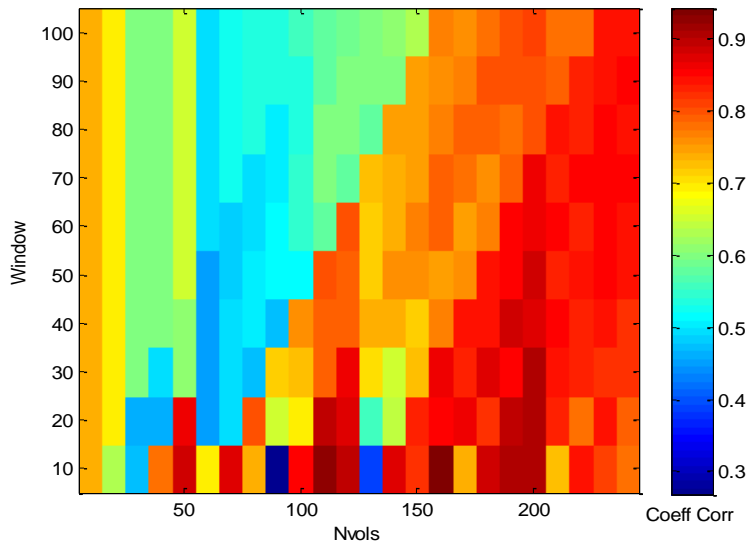


Figure 47 : Fenêtre glissante pour le poids

Comme on voit que la ressemblance entre des graphiques conso/variable se produit par zones, on serait intéressés à savoir la corrélation locale, et pas au niveau global comme auparavant.

Pour ça on a développé un code qui calcule ce coefficient local pour différentes tailles d'une fenêtre qui glisse. Pour pouvoir mieux comparer l'évolution dépendant de la taille cette fenêtre glissante, on a fait un plot où la corrélation est définie par des couleurs (Figure 47).

On peut voir dans ce cas (où les couleurs représentent la corrélation consommation-poids) que le poids devient plus corrélé avec le temps. (Il s'agit peut être d'un effet saisonnier.) On doit aussi noter qu'il y a un artefact au début de l'affichage, mais que la corrélation ne descend jamais à 0.

## Réunion répétition RIM

Un des invités à ma RIM Début du stage (le responsable du système de monitoring à Snecma) qui n'a pas pu venir m'a demandé de la répéter pour lui, et j'ai bien sûr accepté. Après avoir vu mes résultats il a posé beaucoup de questions, suggestions et possibles réponses aux questions en suspend. Cette réunion a été vraiment utile pour la partie analyse. Les points clés ont été les suivants :

- Regarder la pression en plus de la température.
- Contrôler le point de changement des volets (flaps) de l'avion pendant le vol.
- Essayer de récupérer les pilotes de chaque vol (normalement ils font toujours le même décollage).
- Étudier si l'avion A, différent des autres, est un modèle différent d'avion (parmi le même type d'avion il y a des différences, comme le nombre de places). Effectivement, c'était l'explication au cluster bleu.
- Observer la pente de la montée.

- Compte tenu des résultats sur la température, il propose demander à des experts la vraie influence de la température ambiante dans la phase du décollage.
- Utiliser la courbe de l'EGT comme référence pour contrôler des autres indicateurs de la performance : chaque fois on fait un nettoyage de la chambre moteur on peut provoquer des effets dans des autres variables.
- Regarder plusieurs trajectoires pour un même avion et trouver celle avec la consommation la moins forte.

Aussi une petite modification dans le code pour traiter le vent a été proposée.

## Création de la base de données

Pour la création de la base de données, on a passé par différentes étapes :

### Conception

Après l'installation et la familiarisation avec SQLite, on découvre que ce langage ne permet pas le stockage de vecteurs. Ensuite, après un peu de recherche sur ce problème, on implémente trois possibles versions de la base de données qui traitent de ça :

- Version 1 : La première solution que l'on trouve est de convertir les vecteurs en tableaux de texte avec quelques séparateurs génériques pour son stockage, et re-séparer l'info après chaque accès. Bien que ce traitement diminue considérablement la taille de la base de données par rapport à d'autres implémentations, il compromet l'accès, et ne représente pas une amélioration sur le format qui n'est ni standard ni propre à l'entreprise (même remarque pour les autres implémentations).
- Version 2 : Une autre solution est d'enregistrer les vols ou les variables dans des tables séparées, mais ce sera vraiment inefficace au niveau du stockage et de l'abstraction, et chaque fois que l'on voudra modifier la base de données on aura beaucoup de problèmes pour gérer toutes les tables.
- Version 3 : Il ne reste alors qu'une possibilité : dans la troisième version, on a une table où les colonnes sont les variables et on identifie chaque entrée avec des vols et des indices pour pouvoir conserver l'ordre correct des observations. Pour l'info non technique du vol on a aussi une table avec un registre par vol, liée avec l'autre par le numéro du vol. Finalement, une table pour des avions est aussi créée pour conserver la hiérarchie abstraite et pour permettre le stockage des éventuelles analyses par avion.

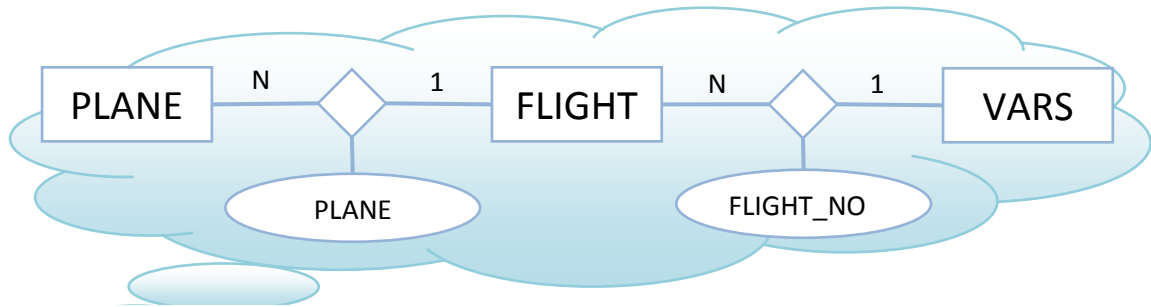


Figure 48 : Design choisi (version 3)

## Création et remplissage

Pour créer et peupler la base de données, j'ai écrit des codes pour chaque table. Durant la progression de mon étude, j'ajoute de nouvelles tables et colonnes pour faciliter l'accès et augmenter la quantité d'information disponible en fonction de l'analyse:

- Une table avec les aéroports est ajoutée : on ne dispose que du code, on serait intéressés aussi par la connaissance de la ville et la situation de chaque aéroport.
- En ce qui concerne l'analyse par vol, une table VIP (Variables d'Intérêt pour la Performance) enregistrera des infos comme la consommation, le poids moyen, le temps pour la zone de climb... ainsi on ne perdra pas de temps à refaire les calculs au début de chaque analyse.
- INDX nous dit le numéro de vol dans chaque avion (c'est une façon de lier le vrai numéro du vol avec la position dans les graphs) et l'instant de la mesure dans les variables (le numéro du composant du vecteur).

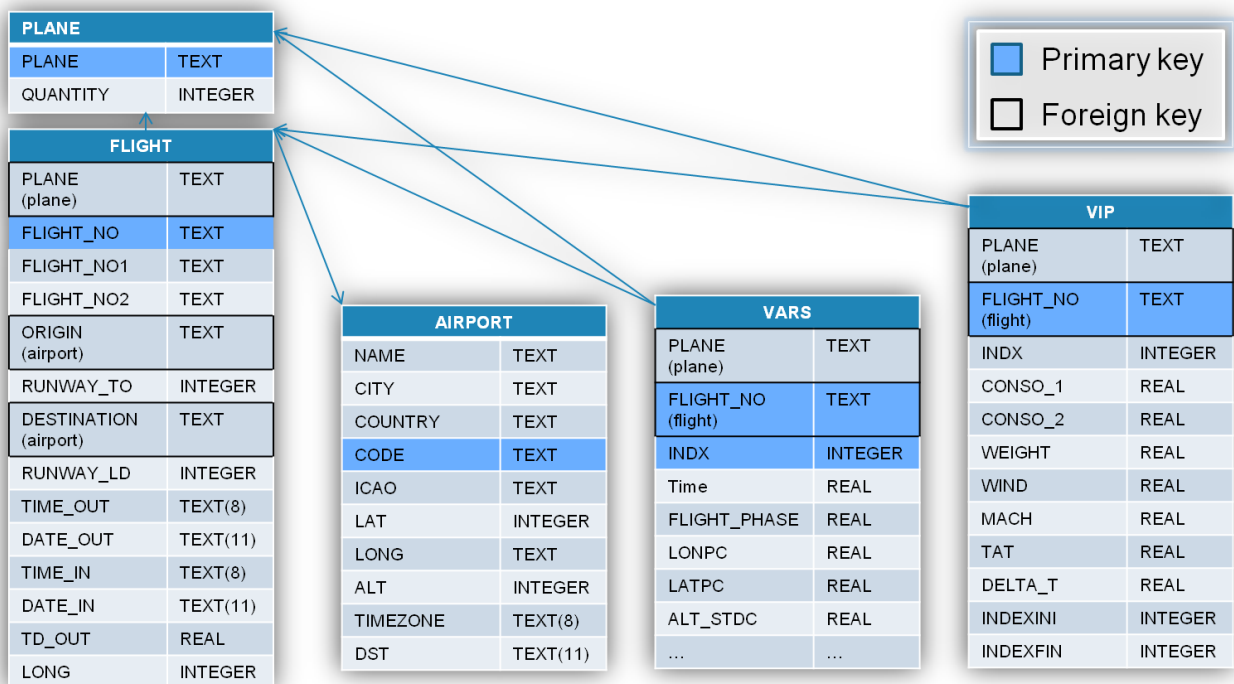


Figure 49 : Design final

## Optimisation

### Contraintes

En plus des Primary Keys et des Foreign Keys spécifiées, on a décidé aussi d'ajouter des contraintes intrinsèques à la logique des variables : la consommation ne peut pas être négative, l'index de début de la zone de climb (VIP.INDEXINI) doit être plus petit que l'index de fin (VIP.INDEXFIN)...

### Index/Triggers

Finalement, on ajoute des INDEX et des TRIGGERS pour augmenter la vitesse et la consistance de la base.

- Les INDEX sont développés sur FLIGHT\_VOL, PLANE et INDX (parce que normalement on cherche par vol et avion, et en ordre temporel).
- Les TRIGGERS préparent la base pour effacer automatiquement les variables d'un vol quand on l'enlève de la base, et aussi pour mettre à jour la quantité de vols de chaque type d'avion et la taille des vecteurs de mesures (VARs).

## Accès et opérations

Pour utiliser la base de données, on a plusieurs moyens à disposition:

- L'accès via un langage de programmation (dans notre cas, **Matlab**) pour la connexion et l'envoi de commandes / réception de résultats. Dans le cadre Matlab il y a deux méthodes pour le faire :
  - o Les instructions Matlab pour la gestion base de données, comme **exec**. L'accès est rapide, mais il y a des commandes qu'on ne peut pas faire de Matlab (comme l'importation directe d'autres formats). La syntaxe est la suivante :

```
conn = database('','','','org.sqlite.JDBC','jdbc:sqlite :PATH');  
exec(conn,'INSERT INTO FLIGHT VALUES(-)');  
exec(conn,'SELECT * FROM VARS');  
close(conn);
```

- o La bibliothèque **mkslite**, dédié à SQLite, gratuite et disponible online. Un peu plus lente que **exec**, mais plus facile à utiliser :

```
mkslite('open', 'PATH');  
mkslite('INSERT INTO FLIGHT VALUES(-)');  
mkslite('SELECT * FROM VARS');  
mkslite('close');
```

- L'accès via **CDM ou terminal**. On peut exécuter tous les instructions, mais la visualisation n'est pas très bonne.



- Logiciels dédiés (**SQLiteStudio**, par exemple). Intuitives et la meilleure option pour visualiser les données, malgré sa vitesse normalement moins performante que des méthodes proposées précédemment.

## Résultats

Du point de vue temporel, les requêtes sur la base de données prennent moitié moins de temps que le chargement d'un opset et son filtrage pour obtenir les données cherchées.

Le stockage, en revanche, est plus grand qu'avant les 8 Go csv et les 900 Mo en format opset deviennent presque 14 Go (on doit noter on a ajouté des aéroports, des nouveaux calculs et variables, des triggers et INDEX... mais c'est quand même une augmentation importante).

Finalement, on doit mettre en évidence que maintenant les données sont accessibles pour n'importe qui dans n'importe quel langage ; on peut même voir l'information sans besoin de un langage intermédiaire grâce à la création d'interfaces dédiés et/ou des logiciels existants à cette fin.

# RÉCAPITULATION / TRAVAIL ENVISAGÉ

---

## Analyse

Dans la partie analyse on a obtenu des résultats révélateurs pour retrouver des outliers et préciser l'influence de chaque aspect du vol du point de vue de la consommation, mais on doit essayer trouver une formule plus ou moins performante et applicable à tous les vols.

Pour ça ce sera indispensable l'analyse de tous les outliers trouvés et l'application des idées proposées, aussi que des autres indicateurs de la performance.

La dernière partie du stage sera dédié à l'analyse de toutes les informations recueillies en combinaison avec des nouveaux indicateurs.

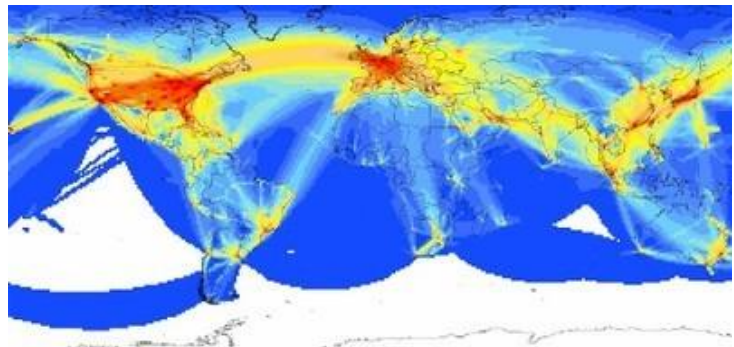


Figure 50 : Consommation fuel du trafic aérien selon la FAA (Federal Aviation Administration) entre 2000 et 2004

## Gestion de données

En ce qui concerne la gestion de données, on a clairement réussi à améliorer l'accès aux données. En fait, la base est déjà opérationnelle, seules de petites modifications éventuelles concernant la performance et l'insertion des nouvelles données sont envisagées.

# CONCLUSIONS

---

## Difficultés

La difficulté principale du stage a été sans doute la communication, due à mon origine non francophone. Néanmoins, tous mes collaborateurs ont toujours été prévenants et ils se répètent quand c'est nécessaire, ou m'expliquent d'une manière différente (ou dans une autre langue occasionnellement). Finalement cette barrière ne m'a pas empêché de mener à bien mon stage. Travailler toute la journée avec le clavier français a également été difficile au début, et m'a fait avancer plus lentement que d'habitude avec l'ordinateur (mais à la fin l'habitude m'a conduit maintenant à avoir des problèmes avec l'espagnol).

Aussi mon manque d'expérience dans le domaine des statistiques appliquées (seulement développées à Paris 13 et pas précédemment) a fait que certaines parties de l'analyse relevaient du défi, mais grâce aux directions de mon tuteur j'ai évité de me bloquer et j'ai pu avancer correctement.

Pour conclure, je n'étais pas habituée aux réunions hebdomadaires ou à rendre des comptes de mes avancements régulièrement (d'habitude j'ai un travail à faire et une date limite, je peux gérer l'intervalle entre chaque jalon comme je le juge opportun). J'ai donc eu besoin d'organiser mon travail d'une manière différente et penser à exprimer chacune de mes idées et chaque doute, je devais aussi me préparer à argumenter mes décisions quand il y a plusieurs façons de réaliser une tâche.

## Contributions

En dehors des notables connaissances culturelles et linguistiques acquises pendant le stage, j'ai obtenu aussi des expériences issues du travail dans une entreprise de la taille de Safran : l'opportunité de participer à des réunions et présentations m'a donné un point de vue différent du fonctionnement interne d'une entreprise.

J'ai aussi enrichi ma base mathématique et informatique, et j'ai pu appliquer dans un environnement réel les connaissances acquises au niveau théorique pendant mes études universitaires et étudier de nouvelles manières d'approcher des problèmes, par exemple, basées sur l'expérience de collègues et souvent difficiles à apprendre dans des livres ou des cours. J'ai eu aussi l'opportunité de suivre des stages d'autres stagiaires en assistant à leurs RIMs, les gazettes ou les conversations. Ils m'ont apporté des connaissances précieuses et une vision élargie des mathématiques appliquées.

Finalement, je peux reconnaître ma progression dans le domaine oral et notamment pour la prise de parole en public. Un point que j'avais toujours craint et que maintenant, grâce à l'entraînement en force, principalement au cours du stage et au cours de mon séjour en France, je ne ressens plus d'angoisse et auquel je suis prête à faire face plus régulièrement.



# ANNEXE 1 : L'HISTOIRE DE SAFRAN

---

**Safran est le plus ancien motoriste d'aviation au monde. Composé de nombreuses sociétés recentrées continuellement sur leur cœur de métier, il écrit depuis plus d'un siècle l'histoire de l'aéronautique, de la défense et de la sécurité.**

## 1905 - 1924



Louis et Laurent Seguin, inventeurs du premier moteur rotatif d'aviation, de 7 cylindres en étoile, l'Omega

Le 6 juin 1905, Louis et Laurent Seguin fondent la société des moteurs Gnome à Gennevilliers, près de Paris. En quelques années, ses moteurs rotatifs en étoile pour avions s'imposent dans le monde entier.

En 1912, Louis Verdet crée la société Le Rhône et devient en deux ans le principal concurrent de Gnome. Ce dernier l'absorbe très rapidement ; cette fusion donne naissance à la Société des Moteurs Gnome & Rhône. Après la Première guerre mondiale, Gnome & Rhône est l'un des premiers fabricants mondiaux de moteurs d'avions.

## 1925 - 1945

Marcel Môme crée, en 1925, la Société d'Applications Générale d'Electricité et de Mécanique (Sagem) dont l'activité principale consiste à "faire de la mécanique". Très rapidement, Sagem diversifie ses activités et réalise des équipements de précision pour la Marine nationale. Création en 1932 de la Société d'Application Téléphonique, dont Sagem prend le contrôle en 1939 sous le nom de Société Anonyme de Télécommunications (SAT), devenant ainsi un acteur de la téléphonie et des transmissions.



Marcel Môme, fondateur de SAGEM

## 1945 - 1970

En 1945, Gnome & Rhône est nationalisé, prend le nom de Snecma et rassemble sous son nom la plupart des motoristes français ayant vu le jour au début du siècle (Renault, Lorraine, Régnier...).

Au fil des années et en parallèle, Snecma et Sagem se diversifient et se renforcent.



Premier tir de Diamant A le 26 novembre 1965, depuis la base Brigitte d'Hammaguir (Sahara).

Au début des années 1960, la SAT conçoit le premier système au monde de guidage infrarouge d'un missile air-air. Et Sagem produit la première centrale de navigation inertielle française, qui s'envole sur un Nord 2501 du Centre d'Essais en Vol de Brétigny. La société réalise alors le guidage des engins balistiques de la force de frappe et le périscope du sous-marin nucléaire lanceur d'engins. En 1965, la fusée Diamant A, guidée par une centrale inertielle Sagem, satellise pour la première fois une capsule française. La société fournit également des centrales de navigation inertielle destinées à la conduite d'avions à réaction comme l'Airbus A300.

Aujourd'hui, Sagem est n°1 européen dans ce domaine.

Dans les années 1970, Snecma s'associe à Messier, y adjoint les activités d'Hispano-Suiza, de Bugatti et crée la société Messier-Hispano-Bugatti (MHB), regroupant toutes les activités « atterrisseur ». Messier-Bugatti-Dowty, systémier intégrateur, occupe aujourd'hui la place de n°1 mondial dans ce domaine.

## 1973-1999

En 1973, Snecma entre dans le cercle très fermé des motoristes d'avions civils en signant un accord de coopération avec General Electric Aircraft Engines pour la réalisation du CFM56 (CF pour moteur civil General Electric, M56 pour le 56ème projet Snecma).

Dans les années 1980, la SAT réalise une première mondiale : un réseau commuté triple play sur fibre optique qui fournit aux abonnés sur une seule liaison une gamme complète de services : téléphone, télévision, Minitel. Moins de 10 ans après, la société fournit le décodeur de Canal+, première chaîne de télévision à péage française.



Les présidents qui ont fait le CFM56 : René Ravaud et Gerhard Neumann.

En 1993, Sagem fait l'acquisition de la société américaine Morpho, spécialiste des systèmes de reconnaissance biométrique à base d'empreintes digitales. Aujourd'hui, Morpho est n°1 mondial dans ce domaine.

En 1996, Sagem invente le "Phonefax", un télécopieur grand public, crée le premier téléphone portable GSM français et le premier décodeur de télévision par satellite. Un an plus tard, Snecma absorbe la Société Européenne de Propulsion (SEP) et entre ainsi sur le marché de la propulsion spatiale (lanceur Ariane).

## 2000-2008



Hélicoptère Dauphin AS365 N2 équipé de deux moteurs Arriel 1C2 de Turbomeca

En 2000, le groupe Snecma gère l'ensemble de ses participations dans ses différentes entités. La même année, la Direction Générale pour l'Armement (DGA) choisit Sagem pour réaliser les kits d'assemblage du missile d'Armement Air-Sol Modulaire (AASM).

Turbomeca, motoriste d'hélicoptères, intègre le groupe Snecma et pérennise une aventure technologique initialisée en 1938 par son créateur Joseph Szydlowski. C'est aujourd'hui le leader mondial des turbines d'hélicoptères. Labinal Power Systems, spécialisé dans les câblages aéronautiques, rejoint le groupe Snecma

pour devenir aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans ce domaine.

La société Hurel-Hispano, issue de la fusion d'Hurel-Dubois et d'Hispano-Suiza dans le domaine des aérostructures, prend le nom d'Aircelle en 2005 et devient un des acteurs majeurs sur le marché mondial des nacelles de moteurs d'avions.

À la suite de la création de Safran le 11 mai de 2005, résultat de la fusion de Snecma et Sagem, un recentrage s'impose à nouveau. La cession des activités de communication haut débit et de téléphonie mobile est réalisée en 2008. Dans le domaine de la sécurité, Safran acquiert Sdu-Identification aux Pays-Bas, devenu Morpho B.V.

Safran et General Electric signent au mois de juillet de 2008 la reconduite jusqu'en 2040 de leur partenariat 50/50 dans la propulsion aéronautique.

## 2009 - 2011

Safran poursuit sa stratégie de conquête du leadership dans le domaine de la sécurité en faisant l'acquisition des activités biométriques de la division Printrak de Motorola, qui devient MorphoTrak, ainsi que 81% des activités de Homeland Protection de General Electric, qui deviennent Morpho Detection. Faisant suite au rachat de la société nord-américaine L-1 Identity Solutions, Safran crée en 2011 MorphoTrust USA, Inc.

Safran Corporate University voit le jour, avec pour ambition de créer un campus dédié à la formation et au développement des compétences de tous les salariés du Groupe.



Le moteur LEAP sélectionné pour motoriser l'A320neo



Le LEAP (l'évolution du CFM56, voir Annexe 3) est sélectionné par l'avionneur chinois Comac pour motoriser son avion de ligne commercial C919. Il sera ensuite retenu par Airbus pour motoriser l'A320neo puis par Boeing pour équiper le Boeing 737MAX.

Safran réalise le rapprochement de SME (SNPE Matériaux Energétiques) et de SPS (Snecma Propulsion Solide) qui aboutira à la création d'Herakles, l'un des leaders mondiaux de la propulsion solide. Le 19 septembre 2011, Safran entre dans l'indice CAC 40.

## 2012



Sous la maîtrise d'œuvre de Sagem (Safran), le programme FELIN représente une avancée qualitative majeure

A la fin de l'année, Snecma (Safran) et GE totalisent plus de 4 300 commandes et intentions d'achats de LEAP depuis le lancement du programme, dont 1 096 enregistrées au cours de l'année.

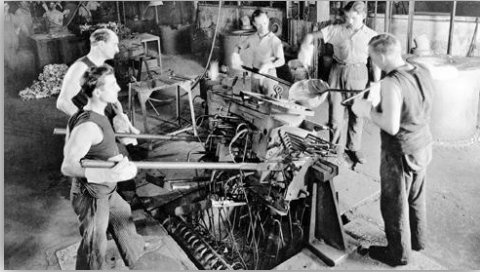
Le turboréacteur de nouvelle génération Silvercrest de Snecma (Safran) a été sélectionné par Cessna Aircraft Company pour motoriser le Citation Longitude, son nouvel avion d'affaires à long rayon d'action, dont l'entrée en service est prévue à l'horizon 2017.

L'Etat français et Turbomeca (Safran) ont renouvelé pour une durée de dix ans le contrat de maintien en condition opérationnelle de ses 1 408 turbomoteurs équipant les hélicoptères utilisés par les forces armées françaises, la sécurité civile et la Direction Générale de l'Armement (DGA).

La Direction Générale de l'Armement (DGA) a réceptionné le 10170ème système FELIN (Fantassin à Equipements et Liaisons INTégrés), pour l'équipement du dixième régiment d'infanterie de l'Armée de Terre. Selon le contrat initial qui portait sur plus de 20 000 systèmes, dix autres régiments seront dotés de FELIN d'ici 2015, au rythme de quatre par an.



## ANNEXE 2 : L'HISTOIRE DE SNECMA



**1905** : Création de la Société des Moteurs Gnome à Gennevilliers par les frères Seguin et lancement des premiers moteurs rotatifs

**1912** : Création de la société des moteurs Le Rhône par Louis Verdet

**1915** : rapprochement des sociétés Gnome et Le Rhône pour créer la Société des Moteurs Gnome & Rhône

**1945** : Regroupement des motoristes aéronautiques français et nationalisation sous une nouvelle raison sociale : S.N.E.C.M.A. (Société Nationale d'Etudes et Construction de Moteurs d'Aviation).

**1948** : Premier moteur militaire à réaction Snecma ATAR 101V

**1974** : Signature de l'accord Snecma/General Electric et création de CFM International

**1978** : Premier vol du moteur militaire M53 sur le Mirage 2000

**1979** : Première commande du moteur civil CFM56. Premier vol des moteurs-fusées Viking et HM7 sur Ariane 1

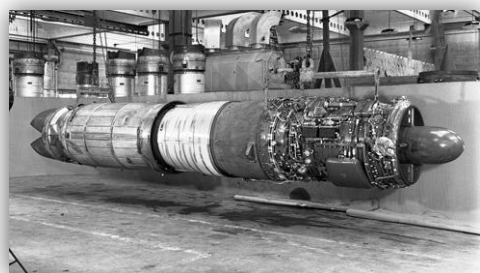
**1990** : Premier vol du moteur militaire M88 sur le Rafale



**1997** : La SEP, rachetée à 100 %, devient une division de Snecma. Premier vol réussi d'Ariane 5. Création de la Division Snecma Services au sein de Snecma, suite au rapprochement de la Sochata avec l'après-vente civile de Snecma.

**1999** : Livraison du 10 000e moteur CFM56. Livraison du 1 000e moteur Viking d'Ariane. Snecma Services et ses trois établissements deviennent une société à part entière, filiale à 100% de Snecma.

**2000** : 100e vol d'Ariane 4. Naissance de la société Snecma Moteurs et création d'une structure de holding (Snecma SA)



**2003** : Lancement du programme SaM146.

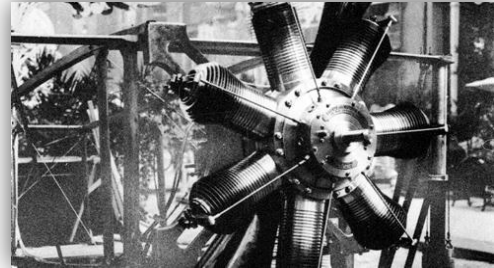
**2005** : Naissance du Groupe SAFRAN issu du rapprochement de Snecma SA avec Sagem. La société Snecma Moteurs reprend le nom historique de Snecma. Lancement de VITAL, le nouveau programme européen de R&T, sous le pilotage de Snecma, pour des moteurs

d'avion plus propres. Lancement du programme technologique LEAP56™. Livraison du 15 000e CFM56.

**2006** : Lancement d'un nouveau concept de moteur baptisé SILVERCREST destiné au marché de l'aviation d'affaires.

**2007** : Entrée en service du CFM56 Tech Insertion.

**2008** : General Electric Aviation et Snecma signent un accord qui prolonge le partenariat 50/50 jusqu'en 2040. Décision ministérielle de la poursuite du financement de Vinci®, nouvelle génération du moteur d'étage supérieur cryotechnique du lanceur Ariane 5.



**2009** : Transfert des activités systèmes de régulation de moteurs d'Hispano Suiza et fusion de Snecma et Snecma Services. Livraison du 20000ème CFM56.

# ANNEXE 3 : LES MOTEURS DE SNECMA

## MOTEURS CIVILS

### CFM56

A travers CFM International (CFM), filiale à parité avec l'américain GE, Snecma est présent sur la majeure partie du marché civil. Les moteurs CFM56, considérés comme les plus fiables de leur génération avec un taux de disponibilité proche de 100 %, sont les moteurs civils les plus vendus au monde. Ils touchent une grande partie du marché des avions de plus de 100 places et offrent une poussée qui s'étend de 18 500 à 34 000 lb. Propulsant de nombreuses versions d'Airbus et de Boeing, ils affichent une réussite commerciale exceptionnelle.

#### Chiffres Clés

- Plus de **24 565** moteurs en service
- Un taux de disponibilité proche de **100 %**
- Plus de **531** clients à travers le monde
- Plus de **627** millions d'heures de vol
- Plus de **10 422** avions Airbus et Boeing équipés
- Plus de **69 000** cycles par jour
- **3 millions** de passagers chaque jour et plus de **135 000** heures de vol par jour
- Un décollage toutes les **2,5** secondes

### CFM56-3



Gamme de poussée :  
**18 500 à 23 500 lb**  
Entrée en service :  
**1984**  
Avions motorisés :  
**Boeing 747-300, 400 et 500**

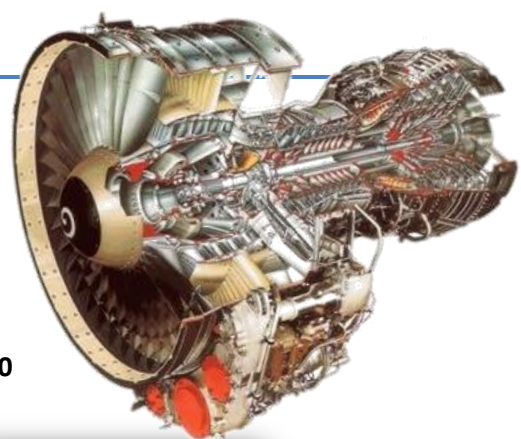


Figure 51: Boeing 747-300

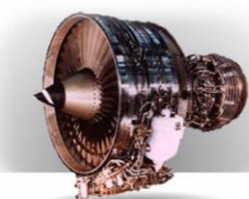


Figure 52: Boeing 747-400



Figure 53: Boeing 747-500

## CFM56-5A



Gamme de poussée :  
**22 000 à 26 500 lb**  
Entrée en service :  
**1988**  
Avions motorisés :  
**Airbus A319 et A320**

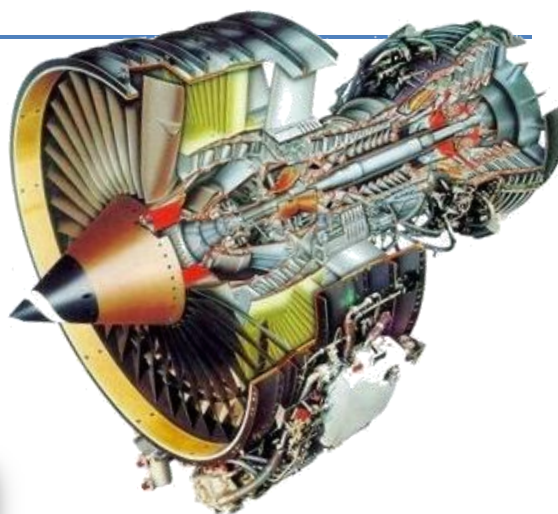


Figure 54: Airbus A319



Figure 55: Airbus A320

## CFM56-5B



Gamme de poussée :  
**22 000 à 30 000 lb**  
Entrée en service :  
**1994**  
Avions motorisés :  
**Airbus A318, A318 Elite, A319, A319CJ, A320 et A321**

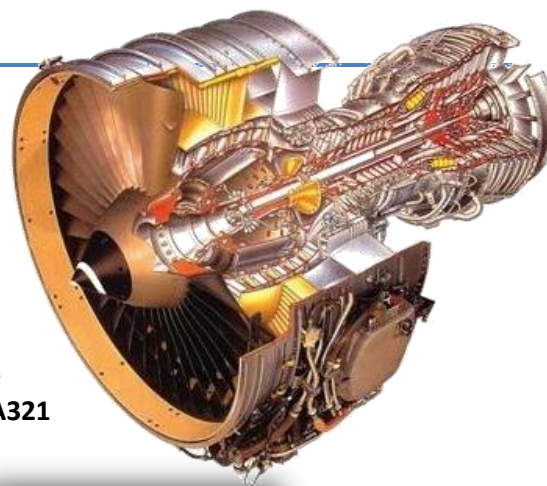


Figure 56: Airbus 318,319



Figure 57: Airbus 320



Figure 58: Airbus 321



## CFM56-5C



Gamme de poussée :  
**31 200 à 34 000 lb**  
Entrée en service :  
**1993**  
Avions motorisés :  
**Airbus A340-200 et 300**

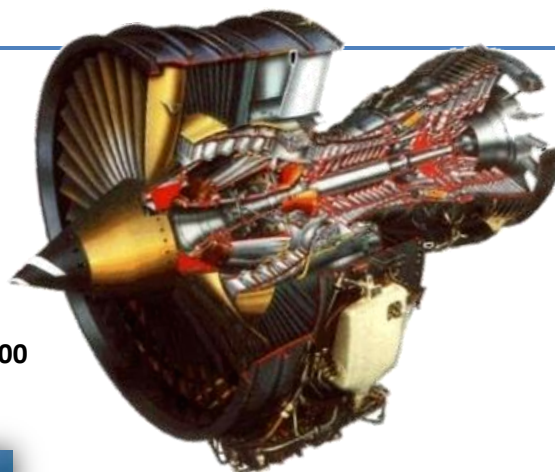


Figure 59: Airbus A340-200



Figure 60: Airbus A340-300

## CFM56-7B



Gamme de poussée :  
**19 500 à 27 300 lb**  
Entrée en service :  
**1997**  
Avions motorisés :  
**Boeing 737-600, 700, 800, 900, 900ER, BBJ AEW&C, C-40, P-8A**

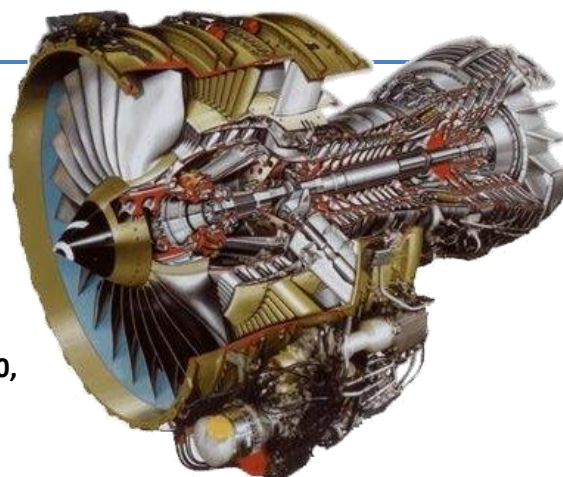


Figure 61: Boeing 737



Figure 62: AEW&C



Figure 63: P-8

## LEAP

Depuis plus de 15 ans, CFM est engagé dans une démarche résolument innovante visant à ouvrir la voie aux moteurs de demain. En 2004, les deux partenaires, Snecma et GE, ont envisagé le lancement d'un moteur entièrement nouveau pour succéder au CFM56. L'année suivante, CFM lançait le programme de recherche et développement technologique LEAP56™. En juillet 2008, Snecma et GE ont annoncé le lancement par CFM d'un nouveau moteur, le LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion), destiné à équiper la future génération d'avions civils monocouloirs.

Trois versions LEAP ont été développées :

- Le **LEAP-1A** a été choisi en décembre 2010 par Airbus comme option de motorisation du nouvel A320neo (new engine option). Après une certification du moteur prévue en 2015, cette nouvelle combinaison avion/moteur est programmée pour entrer en service commercial en 2016.
- Le **LEAP-1B** a été sélectionné par Boeing en août 2011 comme motorisation unique pour le B737 MAX. La certification du moteur est prévue en 2016 ; l'entrée en service, en 2017.
- Le moteur **LEAP-1C** a été sélectionné en décembre 2009 par l'avionneur chinois COMAC pour équiper son avion monocouloir C919. La certification du moteur est prévue pour 2015.



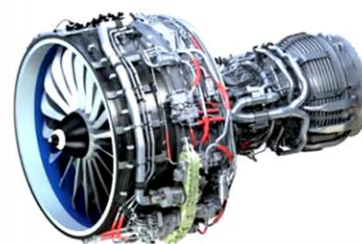
### LEAP-1A Airbus A320neo

- Takeoff thrust up to 32,900 lbs
- Engine certification: 2015
- Entry into service: 2016



### LEAP-1B Boeing 737 MAX

- Takeoff thrust up to 28,000 lbs
- Engine certification: 2016
- Entry into service: 2017
- Exclusive powerplant



### LEAP-1C COMAC919

- Takeoff thrust up to 30,000 lbs
- Engine certification: 2015
- Entry into service: 2016
- Sole Western powerplant/IPS



## SaM146



Figure 64 : Superjet 100

Gamme de poussée :  
**17 300 à 17 800 lb**  
Entrée en service :  
**2011**  
Avions motorisés :  
**Superjet 100**



## Silvercrest



Figure 65 : Citation Longitude



Figure 66 : Falcon 5X

Gamme de poussée :  
**9 500 à 12 000 lb**  
Entrée en service :  
**2015**  
Avions motorisés :  
**Cessna Citation Longitude,  
Dassault Falcon 5X**

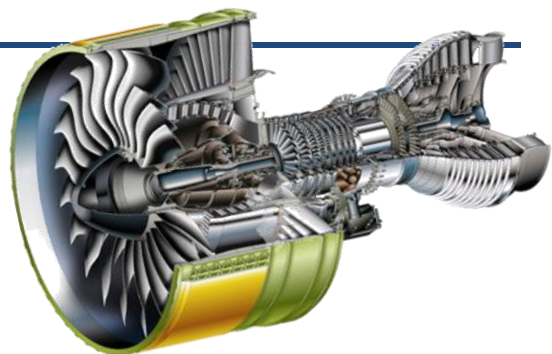


## GP7200



Figure 67 : Airbus A380

Gamme de poussée :  
**70 000 à 85 000 lb**  
Entrée en service :  
**2006**  
Avions motorisés :  
**Airbus A380**



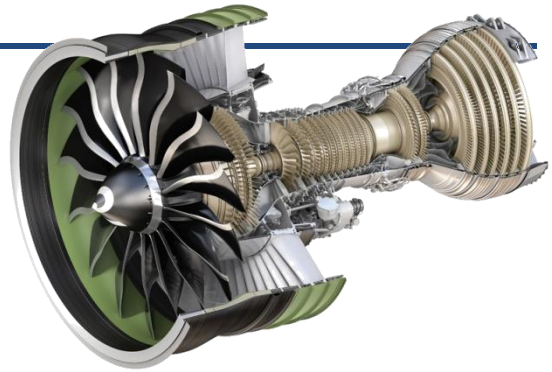


## GE90



Figure 68 : Boeing 777

Gamme de poussée :  
**76 000 à 115 000 lb**  
Entrée en service :  
**1995**  
Avions motorisés :  
**Boeing 777**



## CF6-80



Figure 69 : Airbus A310-200



Figure 70 : Boeing 767

Gamme de poussée :  
**50 000 à 72 000 lb**  
Entrée en service :  
**1982**  
Avions motorisés :  
**Airbus A300, A310, A330**  
**Boeing 747, 767**  
**McDonnell Douglas MD-11**  
**Kawasaki C-2**





## MOTEURS MILITAIRES

### M-88



Figure 71 : Rafale C



Figure 72 : Rafale B/C/M

Gamme de poussée :  
**11 250 à 17 000 lb**  
Entrée en service :  
**2012 (M88-4E)**  
Avions motorisés :  
**Rafale**



### TP-400

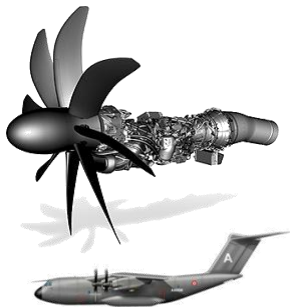


Figure 73 : A400M

Puissance :  
**11 600 cv**  
Entrée en service :  
**2010**  
Avions motorisés :  
**A400M**



### Tyne



Figure 74 : C-160 Transall



Figure 75 : Atlantique ATL2

Puissance :  
**6100 cv**  
Entrée en service :  
**1964**  
Avions motorisés :  
**Airbus C-160 Transall**  
**Dassault Atlantique ATL2**

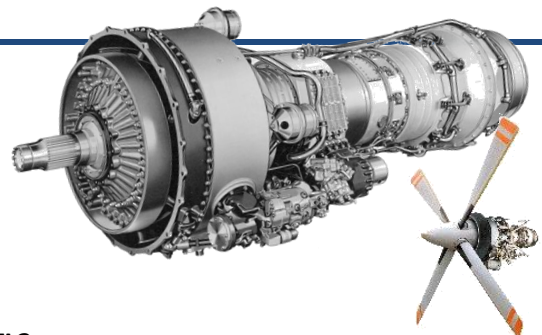


Figure 76 : Tyne avec hélice

## ATAR



Figure 81 : Super Etendard

Puissance :  
**70 kN**  
 Entrée en service :  
**1973**  
 Avions motorisés :  
**Dassault Aviation**  
**Super Etendard et**  
**Mirage III, 5, F1 et 50**



Figure 77 : Mirage III



Figure 78 : Mirage F1



Figure 79 : Mirage 5



Figure 80 : Mirage 50

## LARZAC



Puissance :  
**14 kN**  
 Entrée en service :  
 Avions motorisés :  
**AlphaJet**



Figure 82 : AlphaJet

## M53



Figure 84 : Mirage 2000

Puissance :  
**95 kN**  
 Entrée en service :  
**1969**  
 Avions motorisés :  
**Dassault Mirage 2000**



Figure 83 : Mirage 2000

## CFM56-2



Puissance :  
**98-107 kN**  
 Entrée en service :  
**1982**  
 Avions motorisés :  
**Boeing DC8 Super 70,**  
**AWACS E3/E6, KC-135,**  
**C135FR, KE3, RC-135R**



Figure 85 : Boeing DC-8-70



Figure 86 : Boeing KC-135



Figure 87 : Boeing C135FR

Figure 88 : Boeing KE-3 /  
AWACS E-3, E-6

## MOTEURS SPATIAUX

### HM7B

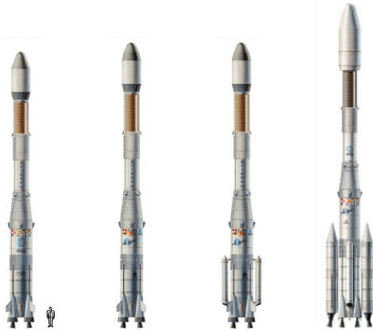


Figure 90 : Fusées Ariane 1, 2, 3 et 4



Figure 89 : Ariane 4

Poussée :  
**64,8 kN**  
 Entrée en service :  
**1979**  
 Applications :  
**3ème étage**  
**Ariane 1, 2, 3 et 4**



### Vulcain 2



Figure 91 : Ariane 5



Poussée :  
**1340 kN**  
 Entrée en service :  
**1998**  
 Applications :  
**Etage Principal**  
**Cryotechnique**  
**d'Ariane 5**



### Vinci



Figure 92 : Ariane 5 ME et Ariane 6



Figure 93 : Vinci

Poussée :  
**180 kN**  
 Entrée en service :  
**2017**  
 Applications :  
**Etage Supérieur**  
**Ariane 5 ME et**  
**Ariane 6**





## PPS 1350-G



Figure 94 : SMART-1

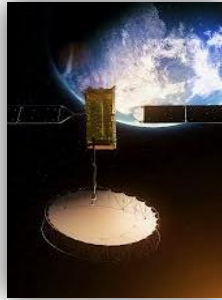


Figure 95 : Alphasat

Poussée :  
**90 mN - Xénon**  
Entrée en service :  
**2005**  
Applications :  
**SMART-1, Alphasat**



## PPS 1350-E

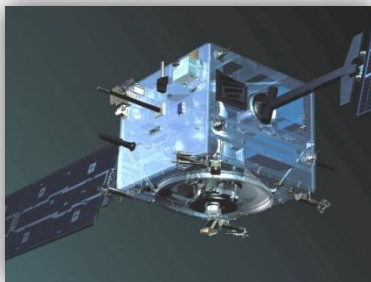


Figure 96 : SMART-1

Poussée :  
**140 mN - Xénon**  
Entrée en service :  
**2003**  
Applications :  
**Preuve SMART-1**



## TMA

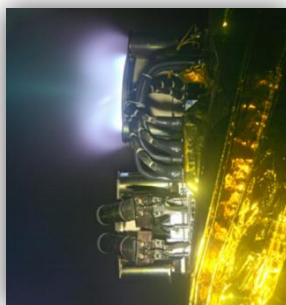
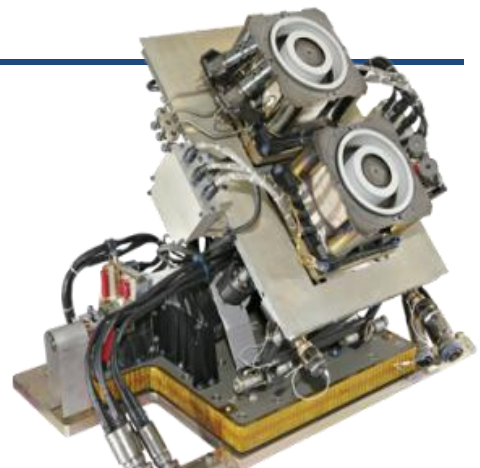


Figure 97 : Essai TMA

Poussée :  
**83 mN**  
Entrée en service :  
**2004**  
Applications :  
**SatCom**



# LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Domaines du groupe Safran .....	9
Figure 2 : Effectifs Safran dans le monde .....	10
Figure 3 : Effectifs Safran par activité et distribution géographique (2013) .....	10
Figure 4 : Safran en chiffres (2013) .....	11
Figure 5 : Chiffres d'affaire par domaine à Safran (2013) .....	11
Figure 6 : Implémentation de Snecma en France.....	13
Figure 7 : Moteurs à Villaroche .....	13
Figure 8 : Site de Villaroche.....	14
Figure 9 : Principaux moteurs développés à Snecma (voir Annexe 3) .....	14
Figure 10 : Représentation du trafic aérien en Europe .....	15
Figure 11 : Trafic aérien mondial en 2009.....	15
Figure 12 : Tendances de croissance des passagers (2011-2012) .....	16
Figure 13 : 24h du trafic Européen (2014) .....	16
Figure 14 : Trafic aérien en temps réel (21/07/2014) .....	17
Figure 15 : Vie d'un avion sans et avec Health Monitoring.....	17
Figure 16 : Cycle PHM Snecma .....	18
Figure 17 : Phases Système Health Monitoring .....	18
Figure 18 : Phases du vol .....	20
Figure 19 : Zones d'intérêt pour l'analyse consommation.....	21
Figure 20 : Distribution de la consommation.....	21
Figure 21 : Obtention de la consommation.....	21
Figure 22 : Planning prévisionnel (20/06/2014).....	26
Figure 23 : Tâches à faire (20/06/2014) .....	26
Figure 24 : Cycle de développement en V.....	28
Figure 25 : Représentation d'un objet signal .....	29
Figure 26 : Représentation d'un objet opset.....	29
Figure 27 : Modèle SAMANTA .....	30
Figure 28 : Modèle Simulink/SAMANTA pour la traduction csv/opset .....	33
Figure 29 : Opset d'un avion (D).....	33
Figure 30 : Exemple table .....	34
Figure 31 : Étapes de l'algo CRN.....	35
Figure 32 : Sortie de normctx .....	36
Figure 33 : Résultats d'adéquation.....	37
Figure 34 : Première approche.....	38
Figure 35 : Normalisation .....	39
Figure 36 : Régression Consommation (Y) –MACH (X) .....	39
Figure 37 : Régression Consommation (Y) –Poids (X) .....	39
Figure 38 : Poids (X) – Consommation (Y) .....	41
Figure 39 : MACH (X) – Consommation (Y) .....	41
Figure 40 : Vent (X) – Consommation (Y) .....	41
Figure 41 : Tendances du poids (à droite) et MACH (à gauche).....	41

Figure 42 : Avion A, moteur 2.....	42
Figure 43 : Normalisation de l'avion A moteur 2 .....	43
Figure 44 : Régression $\Delta t$ (X) – Poids (Y).....	44
Figure 45 : Boxplot $\Delta t$ (Y) – Poids (X) - Taille fixe (10) .....	44
Figure 46 : Boxplot $\Delta t$ (Y) – Poids (X) - Taille constante .....	44
Figure 47 : Fenêtre glissante pour le poids .....	45
Figure 48 : Design choisi (version 3).....	47
Figure 49 : Design final .....	47
Figure 50 : Consommation fuel du trafic aérien selon la FAA (Federal Aviation Administration) entre 2000 et 2004.....	50
Figure 51: Boeing 747-300 .....	59
Figure 52: Boeing 747-400 .....	59
Figure 53: Boeing 747-500 .....	59
Figure 54: Airbus A319 .....	60
Figure 55: Airbus A320 .....	60
Figure 56: Airbus 318,319 .....	60
Figure 57: Airbus 320.....	60
Figure 58: Airbus 321.....	60
Figure 59: Airbus A340-200.....	61
Figure 60: Airbus A340-300.....	61
Figure 61: Boeing 737.....	61
Figure 62: AEW&C .....	61
Figure 63: P-8.....	61
Figure 64 : Superjet 100 .....	63
Figure 65 : Citation Longitude .....	63
Figure 66 : Falcon 5X .....	63
Figure 67 : Airbus A380 .....	63
Figure 68 : Boeing 777.....	64
Figure 69 : Airbus A310-200 .....	64
Figure 70 : Boeing 767.....	64
Figure 71 : Rafale C.....	65
Figure 72 : Rafale B/C/M .....	65
Figure 73 : A400M .....	65
Figure 74 : C-160 Transall .....	65
Figure 75 : Atlantique ATL2 .....	65
Figure 76 : Tyne avec hélice .....	65
Figure 77 : Mirage III.....	66
Figure 78 : Mirage F1.....	66
Figure 79 : Mirage 5.....	66
Figure 80 : Mirage 50.....	66
Figure 81 : Super Etendard.....	66
Figure 82 : AlphaJet .....	66
Figure 83 : Mirage 2000.....	66
Figure 84 : Mirage 2000.....	66
Figure 85 : Boeing DC-8-70.....	66

Figure 86 : Boeing KC-135 .....	66
Figure 87 : Boeing C135FR.....	66
Figure 88 : Boeing KE-3 / AWACS E-3, E-6 .....	66
Figure 89 : Ariane 4 .....	67
Figure 90 : Fusées Ariane 1, 2, 3 et 4.....	67
Figure 91 : Ariane 5 .....	67
Figure 92 : Ariane 5 ME et Ariane 6.....	67
Figure 93 : Vinci .....	67
Figure 94 : SMART-1 .....	68
Figure 95 : Alphasat.....	68
Figure 96 : SMART-1 .....	68
Figure 97 : Essai TMA.....	68

# LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Avions et vols à analyser.....	22
Tableau 2 : Présentation des RIMs.....	23
Tableau 3 : Variables dans le fichier n vol_DATA.csv .....	32
Tableau 4 : Variables dans le deuxième fichier csv .....	33
Tableau 5 : Coefficients de corrélation .....	40
Tableau 6 : Comparaison des coefficients de corrélation .....	40
Tableau 7 : Coefficients de corrélation pour la température (TAT) et le vent (de face ou latéral) .....	43

# BIBLIOGRAPHIE

---

Lacaille, J., 2009. Standardized Failure Signature for a Turbofan Engine. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*.

Lacaille, J., Gouby, A. & Piol, O., 2013. Wear Prognostic on Turbofan Engines.

<http://www.cfmaeroengines.com>

<http://www.snecma.com>

<http://www.safran-group.com>

