

## Détermination de la limite de fonctionnement à coût minimum du moteur d'aviation Pratt et Whitney R. 2800

par D. BINDLER-GASPARD (Belgique)  
*Attachée à la Recherche Opérationnelle de la Sabena*

### *Origine de la simulation.*

C'est seulement l'histoire d'une simulation qui s'achève que je vais vous résumer ici.

Je voudrais surtout, durant le laps de temps qui m'est assigné, faire revivre devant vous les différentes difficultés rencontrées au cours de la création de cette simulation et vous signaler les moyens que nous avons dû utiliser pour les surmonter.

Depuis fort longtemps déjà, le service Planning de la Sabena, songe à une méthode scientifique qui ordonnerait et valoriserait ses connaissances pratiques et lui permettrait de connaître assez rapidement la période optimum de révision d'un nouveau moteur; c'est-à-dire la limite de fonctionnement qui, pour un taux d'avaries admissible, minimiserait le coût horaire.

Aussi, lorsqu'en mars 1960, le Groupe de Travail « Gestion du Matériel » de l'AGESCI décida d'aborder l'étude d'un problème réel d'usure et de remplacements, celui de la Sabena fut adopté à l'unanimité.

Il fut alors immédiatement pris en charge par le Groupe de Travail, dirigé scientifiquement par Monsieur Kaufmann (1); et d'analyse en critique, de critique en analyse, il prit finalement forme.

Dès les premières discussions, une conclusion était certaine : le problème à étudier ne se prêtait guère par sa complexité, inhérente aux phénomènes d'usure et de fatigue et à leurs interactions à une représentation analytique. Nous ne pouvions donc le résoudre que dans le contexte d'une simulation.

C'est-à-dire que nous avions à fabriquer un échantillon artificiel de la population moteurs, à l'aide duquel nous allions retracer la loi d'usure de ce moteur et de là, simuler en ordinateur, toutes les politiques possibles de révision parmi lesquelles nous aurions alors à déterminer la plus satisfaisante.

---

(1) Professeur à l'Institut polytechnique de Grenoble. - Conseiller scientifique à la Compagnie des Machines Bull.

Ou encore :

1) Nous allons devoir simuler des *enlèvements moteurs* soit pour *fin d'heures*, soit pour *avaries*.

2) Opter dans le cas de l'avarie entre un certain type de *réparation* et la *révision* totale.

3) Calculer, dans chaque cas, le *coût* de réparation ou de révision en tenant compte entre autre, de la valeur de la pièce avariée (s'il y en a une), de la valeur de chaque pièce déclassée, des frais de main-d'œuvre et d'atelier.

4) Déterminer les moyennes mobiles des coûts horaires et des taux d'avaries et en déduire la période optimum.

#### *Choix du moteur.*

La première décision était prise, nous allons construire une simulation. Quel type de moteur allons-nous choisir comme modèle de la simulation?

Il fallait, pour qu'il soit à même de tester l'efficacité de la simulation, que ce soit à la fois un moteur bien connu et suffisamment stable; c'est-à-dire n'ayant subi ces dernières années aucune modification importante pouvant affecter d'une façon sensible son comportement.

C'est en effet un des plus stables et des plus anciens moteurs de la Sabena et nous possédons à son sujet de nombreuses informations qui nous ont permis d'établir des statistiques fort valables.

#### *Définition du moteur.*

Or durant la simulation, il est nécessaire de pouvoir engendrer à l'aide d'une méthode de Monte-Carlo (The Power Method) des avaries des pièces du moteur aussi bien que des déclassements de pièces, c'est-à-dire que nous devons donc fournir comme données à la simulation les courbes de survie des différentes pièces du moteur.

Après avoir soigneusement examiné les renseignements à notre disposition, le moteur a été considéré comme un assemblage de pièces principales réparties en 14 familles et de pièces secondaires réparties en 5 groupes.

Nous avons dénommé pièces principales, celles dont la consommation moyenne dépasse la valeur 100 \$ par révision sur base du prix catalogué. Exemples : cylindres, pistons, vilebrequin.

Toutes les autres pièces ont été appelées pièces secondaires et cataloguées en 5 groupes.

Chaque groupe a été constitué de telle manière que toutes les causes d'avaries des pièces du groupe entraînent un même type de réparation que nous supposons standard par exemple : Groupe C : Avaries entraînant un remplacement de cylindres en atelier.

De plus les pièces principales au nombre de 136 par moteur seront individualisées durant la simulation (18 cylindres, 18 pistons, 1 vilebrequin...), tandis que les pièces secondaires resteront banalisées en cinq groupes distincts.

Cette identification du moteur à un assemblage de pièces principales et secondaires est la grande particularité et je pense même la grande originalité de cette simulation (du moins parmi les modèles de même nature des compagnies aériennes).

Le moteur étant ainsi défini, il a fallu passer à l'établissement des courbes de survie de ses différentes composantes.

Monsieur Kaufmann fit alors appel à Monsieur Descamps (2) qui dès ce moment fit bénéficier le groupe de son expérience en matériel aéronautique entre autre pour le relevé des échantillons et l'extrapolation des courbes de survie.

#### *Courbes de survie.*

Les échantillons de pièces principales relevés pour l'établissement des lois de survie « déclassements » proviennent de fiches établies lors de la mise en service de ces mêmes pièces.

Les fiches indiquent l'âge auquel la pièce a été déclassée ou si elle est encore en service, le n° du moteur sur lequel elle est montée.

Pour tracer les courbes de survie déclassements, nous avons utilisé deux des méthodes fournies par Monsieur Descamps.

1) Nous avons surtout appliqué la méthode dite « générale » qui consiste à relever, à une date de base fixée, la situation et l'historique de tous les équipements.

Toutefois, cette méthode étudie le comportement de toute la population alors que nous devons nous limiter à l'étude d'un échantillon.

Cet échantillon comportant en moyenne 100 à 200 pièces est relevé au hasard dans la population des 5 dernières années. De plus sont uniquement admises les pièces considérées depuis le début de leur mise en service (origine O) jusqu'à une certaine date finale.

(2) Directeur des Etudes de Recherche Opérationnelle à la S.E.M.A. (Paris).

2) Dans le cas où seule la population des morts était parfaitement connue, la méthode dite « Méthode des matériels de première monte ».

Ayant ainsi obtenu les courbes expérimentales de survie déclassements de certaines pièces principales, nous avons supposé que le *taux de survie déclassements* d'une pièce est composé d'un terme constant et d'un *terme proportionnel à une certaine puissance du temps* :

$$r_0 + r_1 t^x$$

et nous avons égalé, toute comme dans la méthode élaborée par Pascaud :

- 1) le taux de survie des courbes expérimentale et théorique à l'âge T (limite de validité de la statistique);
  - 2) la vie moyenne des courbes expérimentale et théorique au même âge T;
- ce qui nous a permis de déterminer le taux de survie déclassements des pièces principales

$$e^{-(r_0 t + r_1 t^{(x+1)})}$$

Notons qu'en moyenne les courbes de survie théorique ne s'écartent que de quelques % des points expérimentaux.

Quant aux pièces principales dont nous ne disposions pas d'autre statistique que la consommation, nous avons évalué leurs lois de survie déclassements par analogie avec les lois de survie déclassements connues des pièces principales équivalentes, c'est-à-dire similaires par la nature et par les sollicitations subies.

Nous n'avons déterminé aucune loi de survie déclassements des groupes de pièces secondaires car le coût de déclassement des pièces secondaires ne représente qu'une faible part du coût total d'une révision et peut être considéré comme constant.

Par contre, nous avons recherché les courbes de survie avaries des groupes de pièces secondaires en utilisant la seconde méthode citée précédemment; ces courbes jouent un rôle fondamental dans la simulation puisque environ 70% des avaries sont dues aux pièces secondaires.

Nous n'avons pas su extraire de la faible population des pièces principales avariées, la loi de survie avaries de chaque famille de pièces principales.

Nous basant alors :

- 1) sur l'hypothèse plausible que les critères de déclassement donnés par le constructeur sont supposés être établis de façon que si une pièce portant une usure ou un défaut déterminé peut être remise en service d'après les normes du constructeur, cela suppose qu'elle pourra en toute sécurité effectuer au moins une période moteur;

- 2) et sur la restriction supplémentaire qu'une avarie peut se produire durant les premières heures de vie d'une pièce, nous avons su construire la loi de survie avaries de chaque pièce principale à partir de la loi de survie déclassements correspondante.

C'est-à-dire que la courbe de survie « avaries » est obtenue par le déplacement de la courbe de survie « déclassements » correspondante d'un *potentiel*,  $\Delta HV$ , vers la droite en admettant toutefois que le *taux de survie est linéaire* durant les premières heures de fonctionnement.

La valeur de  $\Delta HV$  et la pente de la droite ne peuvent être obtenues ni par essai, ni par relevé statistique, nous devons donc entamer la simulation avec des valeurs vraisemblables; celles-ci seront modifiées en cours de calcul si le pourcentage d'avaries obtenu s'écarte de la réalité; ces modifications provoqueront un arrêt du programme et la simulation devra être relancée avec les nouvelles données.

#### *Coûts.*

L'élaboration des lois de survie étant achevée, il ne nous restait plus qu'à estimer les différents coûts de réparation et de révision d'un moteur.

Nous avons su affecter la révision sans déclassement de pièces principales d'un moteur Pratt et Whitney R-2800 d'un prix standard.

De même nous avons évalué le coût standard de chacun des 5 types de réparation sur lesquels sont greffés les 5 groupes de pièces secondaires et suite d'ailleurs à ce calcul, nous avons réparti les 14 familles de pièces principales en ces cinq groupes.

De plus, dans le cas d'une avarie, nous avons encore tenu compte d'un coût moyen supplémentaire à ajouter à la réparation ou à la révision qui découle de cette avarie, ce coût moyen supplémentaire est fonction de la probabilité que présente une avarie moteur, d'immobiliser un avion en escale et par conséquent d'entraîner des frais extraordinaires d'exploitation et de dépannage.

#### *Test économique.*

Avant d'entamer la construction logique de la simulation en 1401, nous avons encore conçu un test économique qui permet en cas d'avarie de brancher le moteur vers la réparation ou la révision, ce test doit en somme refléter au mieux, la politique suivie à l'atelier de base.

*Types de simulation.*

Toutes les données sont enfin prêtes.

Une dernière fois, le Groupe de l'AGESCI discute de la ligne générale que doit suivre la simulation.

Au départ de la simulation, nous considérerons une population de 48 moteurs à l'état neuf.

Nous simulerons un certain temps d'utilisation (par exemple 5 ans) et nous adopterons comme unité de temps : 100 H.V.

En fait nous choisirons deux politiques extrêmement différentes de la simulation que nous dénommerons simulation Type I et simulation Type II.

Lors du 1<sup>er</sup> type de la simulation, nous étudierons les effets du choix de certaines valeurs de la période moteur, en essayant dans chaque cas d'atteindre le régime permanent.

Tandis que lors du 2<sup>me</sup> type de la simulation, nous étudierons les effets consécutifs dus à l'augmentation graduelle de la valeur de la période moteur en régime dynamiquement transitoire, ce qui reflète mieux la réalité.

D'après les résultats obtenus, principalement le taux d'avaries et le coût horaire, nous pourrions envisager éventuellement d'autres politiques, par exemple, fixer une certaine limite d'utilisation à certaines pièces principales et de là en déduire finalement la période de révision optimum du moteur.

La méthode de résolution étant définie, nous n'avions plus qu'à exprimer le problème en logique ordinateur.

Une nouvelle phase commençait qu'il est impossible de décrire ici sans faire un cours détaillé sur la logique générale des ordinateurs qui est plus rigide que la nôtre.

*Forme de la simulation.*

Nous avons décidé de scinder la simulation en 3 phases ou plus exactement en 3 programmes.

Le premier servirait à l'élaboration du catalogue; c'est-à-dire qu'il créerait les 48 carnets moteurs.

Chaque carnet moteur comprendrait : une information détaillée pour chaque pièce principale (soit 136 par moteur) et une information également détaillée pour chaque groupe de pièces secondaires (soit 5 par moteur).

Cette information détaillée contient entre autre l'âge, le coût de la pièce, les coefficients des courbes de survie...

Le second ne serait autre que la simulation qui utiliserait constamment le catalogue fourni par le premier.

Quant au troisième qui servirait à tester la validité du régime permanent, nous ne nous en sommes pas préoccupés jusqu'à maintenant.

*Organigrammes et ordinogrammes.*

Nous avons alors préparé, fort méticuleusement, en deux étapes, la programmation de ces deux phases fondamentales.

Nous avons d'abord présenté la résolution du problème sous forme d'organigrammes qui expriment la simulation en logique ordinateur et puis nous avons développé ces organigrammes en ordinogrammes qui détaillent la simulation suivant la logique de l'ordinateur responsable, soit l'IBM 1401 (4000 digits, 4 armoires à bande).

*Programmation de la simulation.*

La simulation a alors été programmée pour son utilisation en 1401.

Le premier programme « Elaboration du catalogue » utilise deux armoires à bande et occupe approximativement 3.800 digits.

Le deuxième ou simulation utilise 4 armoires à bande dont une contient le programme et occupe approximativement 10.000 digits.

*Nature des résultats.*

Chaque fois que tous les moteurs de la population auront tourné 1.000 HV, le coût horaire moyen et le taux d'avaries moyen seront imprimés en même temps que le nombre de réparations, le nombre de révisions, le nombre de moteurs avariés et la période traitée.

Au même instant, nous sortons également des cartes résultats contenant le coût horaire moyen et le taux d'avaries moyen; celles-ci nous permettront par la suite de tester la nature du régime de la population moteurs, tandis qu'en cours de simulation, nous imprimons des indications concernant la nature des avaries, des pièces déclassées, les coûts des réparations et des révisions, et qu'à la fin de l'étude d'une période moteur, nous imprimons entièrement le nouveau catalogue.

Afin de pouvoir sans inconvénient arrêter la simulation en cours de calcul et surtout de pouvoir répartir sans ennui, nous perforons, après chaque cycle de 100 H.V. de toute la population moteurs, une carte pilote qui nous permettra de recommencer la simulation où nous l'avions laissée.

*1<sup>er</sup> essai.*

Nous avons ensuite passé plusieurs heures à la 1401 pour vérifier toute la programmation jusqu'en ses moindres ramifications.

Vers la mi-avril, cette année, nous avons lancé la simulation après quelques heures de travail, nous nous sommes aperçus que le taux d'avaries obtenu restait supérieur au taux d'avaries réel.

Nous avons alors revu avec des ingénieurs spécialisés en moteurs Pratt et Whitney R-2800, la méthode utilisée pour construire les courbes de survie avaries à partir des courbes de survie déclassements. Il est apparu que la corrélation entre les critères de déclassement d'une pièce et les avaries subies par cette pièce est minime ou du moins varie fortement suivant la nature de la pièce.

Sans écarter définitivement cette première méthode qui mérite d'être testée soigneusement, nous avons décidé dans l'optique d'une première approche de rechercher l'avarie à l'aide de la courbe de survie avaries entre révisions des pièces principales et de la courbe de survie avaries entre révisions des pièces secondaires en affectant chaque courbe de survie avaries entre révisions d'une pièce principale d'un poids déterminé.

Le programme de la simulation a été modifié en ce sens et nous attendons les nouveaux résultats.

Toutefois, le laborieux travail qui a été fait jusqu'à présent et qui risque d'être encore fort long peut déjà être considéré comme fructueux.

En effet, la nécessité de recréer à l'aide d'un modèle simple le jeu, plein d'interférences des réparations et des révisions moteurs, nous a obligés à repenser toutes les étapes de la vie du moteur, à améliorer le traitement des informations, à revoir les critères adoptés, à s'en poser de nouveaux... en un mot nous a entraînés et nous entraîne encore à parfaire notre connaissance de ce genre de problème, et la politique suivie jusqu'à présent.