

BON DE VOL M 88-2

par

Eric NICOLET
 Centre d'Essais en Vol
 Base d'Essais d'Istres
 13128 Istres Air
 France

RESUME

Le M88-2 est le moteur équipant l'avion de combat polyvalent Rafale. La méthode de qualification en vol de la régulation consiste à réaliser un moteur représentatif du plus mauvais moteur produit en série et de vérifier que celui-ci à un comportement sain dans l'ensemble du domaine de vol.

1. PRESENTATION DU M88-2

Le M88-2 est un moteur double corps, double flux avec post combustion sur les deux flux développant une poussée au plein gaz de 4.8 t et de 7.5 t en pleines charges PC. Sa régulation est de type FADEC assurée par deux calculateurs numériques.

1.1 DESCRIPTION DE LA VEINE

Le moteur est constitué des éléments principaux suivants :

un compresseur basse pression axial à 3 étages avec directrice d'entrée dégivrable à calage variable,

un compresseur haute pression axial à 6 étages avec directrice d'entrée et redresseurs des deux premiers étages à calage variables. Le prélèvement d'air avionneur est disponible en sortie du 6ème étage,

une chambre de combustion annulaire à 16 injecteurs et équipée d'une bougie d'allumage,

une turbine haute pression mono-étage,

une turbine basse pression mono-étage,

les deux corps basse et haute pression sont supportés par 5 paliers au total.

le dispositif de post combustion se compose de :

un bougie d'allumage,
 9 crayons amonts et 9 bras équipés de crayons dans le flux primaire,
 un anneau brûleur dans le flux secondaire.

une tuyère simplement convergente comporte 10 paires de volets chauds actionnés par 5 vérins.

1.2 PRINCIPES DE LA REGULATION

Le système de régulation est composé de deux calculateurs numériques à logiciels identiques, dialoguant entre eux, et des actionneurs hydromécaniques. Ce système régule les paramètres suivants :

régime de rotation du compresseur basse pression par action sur le débit de carburant principal,

étranglement du compresseur haute pression par action sur la tuyère,

débites de post combustion injectés dans les flux primaires et secondaires.

position de la roue directrice d'entrée du compresseur basse pression,
position des stators du compresseur haute pression.

Le système assure en outre :

les fonctions

de la surveillance automatique du démarrage,
du rallumage automatique en sec et en PC.

les limitations :

température turbine maximale en agissant si besoin sur l'ouverture de la tuyère,
régime basse pression maximal,
régime haute pression minimal et maximal,
pression chambre minimale et maximale en agissant sur le débit carburant.

L'ensemble des lois de régulation est élaboré de façon redondante par les deux calculateurs qui reçoivent et traitent tous les signaux en provenance de l'avion et du moteur et élaborent les consignes de régulation.

Ces deux calculateurs dialoguent entre eux, se communiquent leurs résultats de calculs et choisissent le calculateur actif qui commande les différents actionneurs :

doseur sec et électro-robinet stop,
vérins de tuyère,
vérin roue directrice d'entrée,
vérins stators,
doseurs PC, électro- robinet stop PC et électro- robinet crayons PC.

En cas d'anomalie détectée par le système de régulation sur les paramètres d'entrée en provenance de l'avion ou du moteur, celui-ci se reconfigure dans différents mode dégradés signalés ou non au pilote en fonction de la

diminution des performances que le fonctionnement de ce mode entraîne.

2. MOYENS D'ESSAIS UTILISES

2.1 LE SITE D'ESSAIS

Les essais se sont déroulés sur la Base d'Essais d'Istres à l'ouest de Marseille. Les zones aériennes associées permettent une exploration rapide de l'ensemble du domaine de vol : de la montée perfo à 50000 ft à l'accélération supersonique à basse altitude.

2.2 AVIONS BANC D'ESSAIS

Les essais en vol se sont déroulé sur deux avions banc d'essais : le Rafale A équipé d'un moteur GE F404 et d'un M88-2 qui a effectué 391 vols du 9 mars 1990 au 23 décembre 1993 et le Rafale C01 équipé de deux M88-2 qui a effectué 528 vols du 24 mars 1992 au 24 janvier 1996.

2.3 SUIVI TEMPS REEL DES ESSAIS

Les essais sont conduits et exploités en temps réel en salle d'écoute par exploitation du message transmis par télémesure.

3. EPREUVE DU BON DE VOL

L'épreuve du bon de vol permet de vérifier le bon fonctionnement du moteur dans une définition correspondant au cas le plus défavorable prévu pour la série, par suite des dispersions de fabrication et de réglage.

Cette épreuve ne couvre que les limites de fonctionnement gérées par la régulation. Toutes les autres validations du moteur (mécaniques, dynamiques, thermiques, performances ...) sont réalisées par ailleurs.

3.1 LA METHODOLOGIE

La méthodologie du Bon de Vol est de réaliser, par risque de dysfonctionnement, un moteur dont la marge est la plus faible compte tenu du parc des moteurs de série. La définition de ce

moteur, appelé moteur extrême, et la simulation par dérèglement de moteurs représentatifs de ce moteur extrême sont les points déterminants dans la réussite du Bon de Vol.

La méthodologie est la suivante

- 1 identification des risques,
- 2 définition des taux de couverture,
- 3 détermination du dérèglement,
- 4 détermination du moteur moyen,
- 5 réalisation du moteur extrême,
- 6 réalisation des manoeuvres à risque maximales sur les moteurs extrêmes.

3.1.1. IDENTIFICATION DES RISQUES

La régulation du moteur est optimisée de manière à fournir les performances maximales tout en maintenant le moteur dans ses limites de fonctionnement afin d'éviter tout dysfonctionnement.

Parmi les risques de dysfonctionnement d'un moteur, l'expérience acquise pendant le développement ainsi que l'analyse des principes de la régulation ont conduit à retenir les risques suivants :

- décrochage des compresseurs haute et basse pression,
- blocage et dévissage du compresseur haute pression,
- extinction de la chambre de combustion,
- rallumage-redémarrage,
- extinction de la post combustion,
- non allumage de la post combustion.

3.1.2. DEFINITION DES TAUX DE COUVERTURE

En fonction de leurs conséquences sur le fonctionnement du moteur, les risques sont classés en 3 catégories :

- risques conduisant à une situation critique : non allumage de la chambre dans le domaine de rallumage,

risques imposant une action du pilote, par exemple le décrochage du compresseur haute ou basse pression,

risques n'imposant pas une action immédiate du pilote, par exemple le blocage de régime.

A chaque catégorie est associé un taux de couverture décroissant.

3.1.3. DETERMINATION DU DEREGLEMENT

Pour déterminer les dérèglements on va dans un premier temps évaluer la dispersion des moteurs de série puis en déduire, en fonction du taux de couverture choisi, le dérèglement à réaliser pour réaliser la marge du moteur extrême.

3.1.3.1 évaluation de la dispersion

On détermine pour chaque risque l'ensemble des paramètres influents en les classant en deux catégories :

- les paramètres déterministes dont l'influence est quantifiée,

- les paramètres aléatoires dont l'influence n'est pas quantifiée mais obéit à une loi normale.

Les paramètres aléatoires ayant une distribution régie par une loi normale, la dispersion de marge au point critique est la somme des contributions individuelles qui est elle même une variable aléatoire régie par une loi normale.

L'empilement de ces dispersions permettra de définir la dispersion des moteurs et de déterminer la marge du moteur extrême au cas critique.

Prenons l'exemple du risque décrochage du compresseur haute pression (7.7)

On représente dans le champs intrinsèque taux de compression débit réduit la ligne de pompage et le trajet sur la butée d'accélération.

On détermine pour cette première :

les effets déterministes : viscosité, thermique, distorsion, traînage des stators,

les effets aléatoires : qualité du compresseur haute pression et calage des stators.

On fait de même pour le trajet sur la butée d'accélération :

effets déterministes : viscosité, thermique, distorsion, traînage des stators, prélèvements de puissance, prélèvement d'air, densité du carburant,

effets aléatoires : qualité des composants, calage des stators, mesure de la régulation et réalisation de la commande.

3.1.3.2 Détermination du dérèglement.

Ayant déterminé la dispersion des moteurs des séries on déduit la dispersion à couvrir en fonction du taux de couverture choisi. Ce dérèglement sera appliqué au moteur moyen pour réaliser le moteur extrême.

3.1.4 CHOIX DU MOTEUR MOYEN

Afin d'estimer les caractéristiques du moteur moyen on va caractériser un échantillon de moteurs vis à vis de chacun des risques retenus.

On distingue deux catégories de risques :

les risques pour les quels il est possible de mesurer l'écart à la limite (pompage du compresseur HP et BP, blocage dévissage),

les autres pour les quels cela n'est pas possible.

Pour les premiers, on effectue un classement des moteurs de l'échantillon ce qui permet de déterminer l'intervalle de confiance de l'estimation de la moyenne. Le moteur moyen sera pris sur la limite basse de cet intervalle (7.8).

Pour les autres risques, les moteurs de l'échantillon seront simplement triés, c'est à dire positionnés les uns par rapport aux autres et le moteur moyen sera le plus mauvais de l'échantillon (7.9).

Voyons sur deux exemples une méthode de classement et une méthode de tri.

Afin de limiter le nombre d'essais en vol, les classements des risques décrochage du compresseur HP et BP ainsi que le risque de blocage dévissage ont été réalisés au sol avec une confirmation en vol sur quelques points d'essais. Les autres risques ont été triés en vol.

Par exemple la méthode de classement au sol du décrochage du compresseur HP a consisté à placer la ligne de pompage du moteur dans un champ taux de compression débit réduit à partir de la reconstitution de la trajectoire du point de fonctionnement en transitoire lors d'un échelon de carburant. L'échelon de carburant est progressivement augmenté jusqu'à apparition du pompage. Afin d'éviter un pompage intempestif du compresseur BP, la tuyère est maintenue à une position fixe.

Pour le risque de non allumage de la PC, on a réalisé des allumages PC simples (plein gaz sec-ralenti PC) à $n=1$ en ouvrant progressivement la tuyère jusqu'à ce que la PC s'allume tardivement. Etant donné que l'ouverture de la tuyère au delà de sa position régulée entraîne une variation de la richesse PC, cet essai est repris en modifiant celle-ci. De plus pour être sûr d'allumer sur des débits stabilisés on a temporisé le claquage de la bougie d'allumage de la post combustion. Ces essais permettent de positionner les moteurs dans un champ richesse pression de sortie flux secondaire et de déterminer le plus mauvais moteur.

3.1.5 REALISATION DU MOTEUR EXTREME

Le moteur extrême est obtenu en appliquant à ce moteur moyen le dérèglement précédemment obtenu.

Les dérèglages sont réalisés en dérégulant les lois de régulation des paramètres dimensionnant pour chaque risque. Par exemple pour le décrochage du compresseur HP on dérèglera la butée d'accélération pour simuler une diminution de marge ainsi que le calcul de la densité du carburant pour tenir compte d'un

carburant lourd. Ces dérèglages sont réalisés en temps réel par le pilote qui dispose en cabine d'un boîtier "TRIM" (7.10) associé à chaque moteur. Ce boîtier permet de modifier simultanément 5 paramètres parmi les dix programmés pour le vol. Un mnémonique de chaque paramètre modifiable s'affiche dans les écrans de visualisation avec en face le nombre de pas de modification que le pilote affiche en utilisant les clés de droite. Les clés de gauche permettent d'activer et de désactiver les trims. Cette désactivation et activation est également possible par une commande temps réelle située sur la commande des gaz et n'est active que lorsque l'avion est en configuration essais moteurs. Ces boîtiers ont également servi à la mise au point du moteur. Pour des raisons évidentes de sécurité, un seul moteur est dérèglé à la fois

3.1.6. REALISATION DES MANOEUVRES A RISQUE MAXIMALES SUR LES MOTEURS EXTREMES.

L'ensemble des opérations précédentes permettent de déterminer les dérèglages à appliquer pour chaque risque. Ceux-ci sont donnés pour chaque point de vol à réaliser et le pilote dérèglera un moteur à l'extrême en utilisant le boîtier trim. L'épreuve du bon de vol consiste à réaliser sur les moteurs ainsi dérèglés les manoeuvres à risque maximum.

On classe ces manoeuvres en deux catégories :

- les manoeuvres moteur : mouvements de manette de gaz,
- les manoeuvres avion : comme la prise d'incidence, dérapage ...

A chaque risque moteur est associé une ou plusieurs manoeuvre à risque maximum. Ces manoeuvres "élémentaires" permettent de reconstituer l'ensemble des mouvements de manette susceptibles d'être réalisés par un pilote opérationnel.

Pour le décrochage du compresseur HP on a effectué des manoeuvres du type :

reprises : régime intermédiaire ↗ plein gaz sec ou régime intermédiaire une ↗ pleine charge PC,
 agaceries : plein gaz sec ↘ régime intermédiaire ↗ plein gaz sec, plein gaz sec ↘ régime intermédiaire ↗ pleine charge PC ou encore pleine charge PC ↘ régime intermédiaire ↗ plein gaz sec.

Ces manoeuvres sont réalisées à $n=1$, incidence intermédiaire et maximale.

Pour le non allumage de la PC, les manoeuvres essayées sont :

allumage simple : plein gaz sec ralenti PC,
 adf : plein gaz sec pleine charge PC,
 ADF : ralenti sec pleine charge PC.

De même ces manoeuvres sont réalisées à $n=1$, incidence intermédiaire et maximale.

La réalisation des manoeuvres à $n=1$ ne posent pas de problèmes particuliers. Par contre la réalisation des manoeuvres sous incidence maximale demande beaucoup de maîtrise de la part du pilote d'essais. Les dérèglages varient avec le domaine de vol en diminuant avec la vitesse et la prise d'altitude. Les manoeuvres sont généralement réalisées à iso altitude et en diminution rapide de vitesse en haute altitude. Une manoeuvre réalisée avec une vitesse trop forte n'est pas assez critique alors qu'une manoeuvre réalisée avec une vitesse trop faible et cette fois trop critique. Dans les deux cas l'essai n'est pas représentatif. Le suivi en temps réel de l'essai permet immédiatement après l'exécution du point d'essais de vérifier si celui-ci a été réalisé dans les conditions requises.

Essais des modes dégradés :

L'analyse de la régulation dans les modes dégradés permet de déterminer si la marge vis à vis du risque est plus importante qu'en mode normal. Si elle est inférieure ou s'il n'est pas possible de la comparer avec la marge de la régulation normale, les essais seront également réalisés en mode dégradés. Dans le cas contraire, l'essai en mode normal couvre le mode dégradé.

Les transitoires mode normal-mode dégradé et retour en mode normal (lorsque le mode est réversible) sont également essayés.

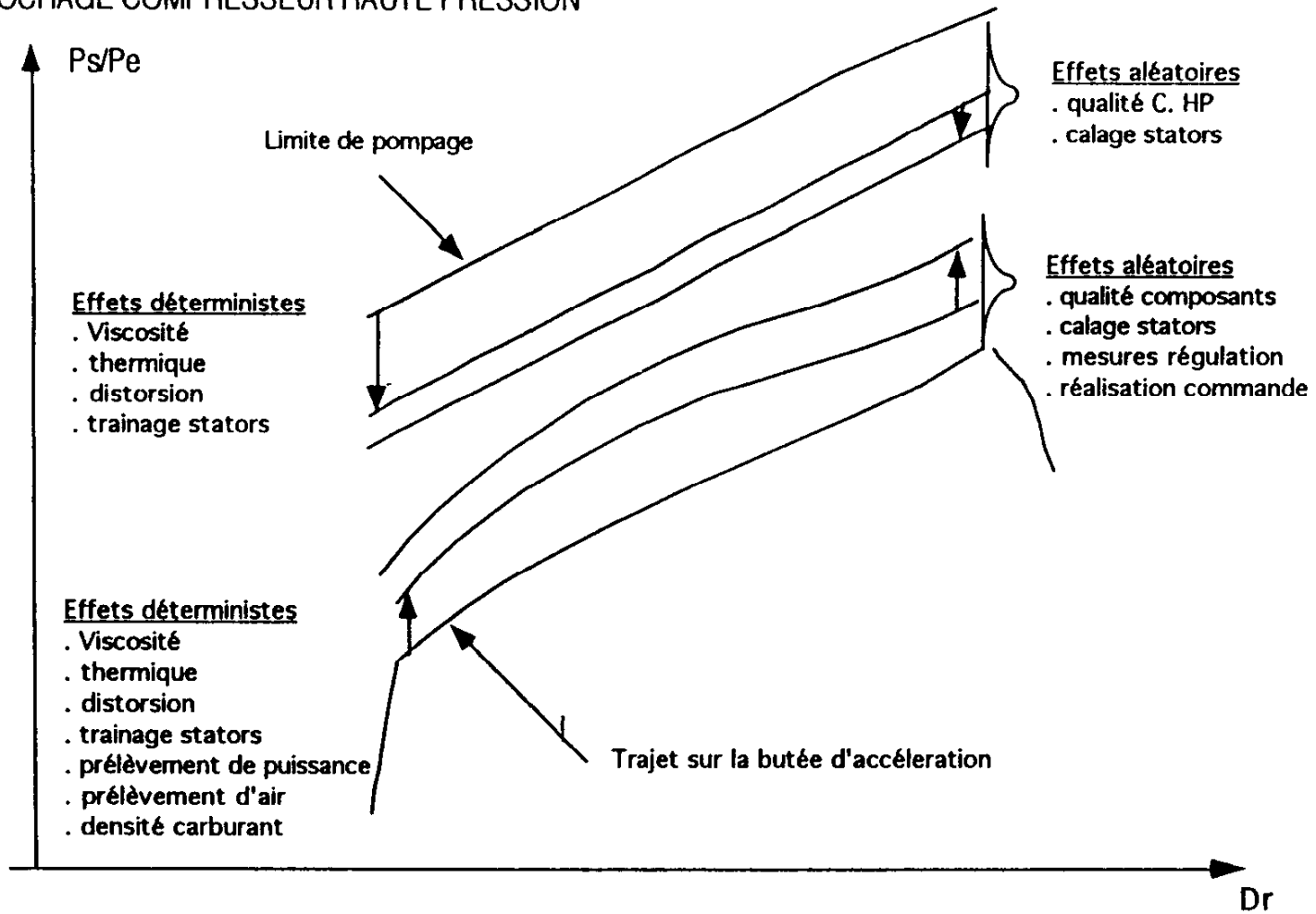
4. CONCLUSION

L'épreuve Bon de Vol (60 vols) s'est terminée le 13 février 1996 et a permis de qualifier le moteur fin mars 1996.

BON DE VOL M 88

DETERMINATION DES DEREGLAGES

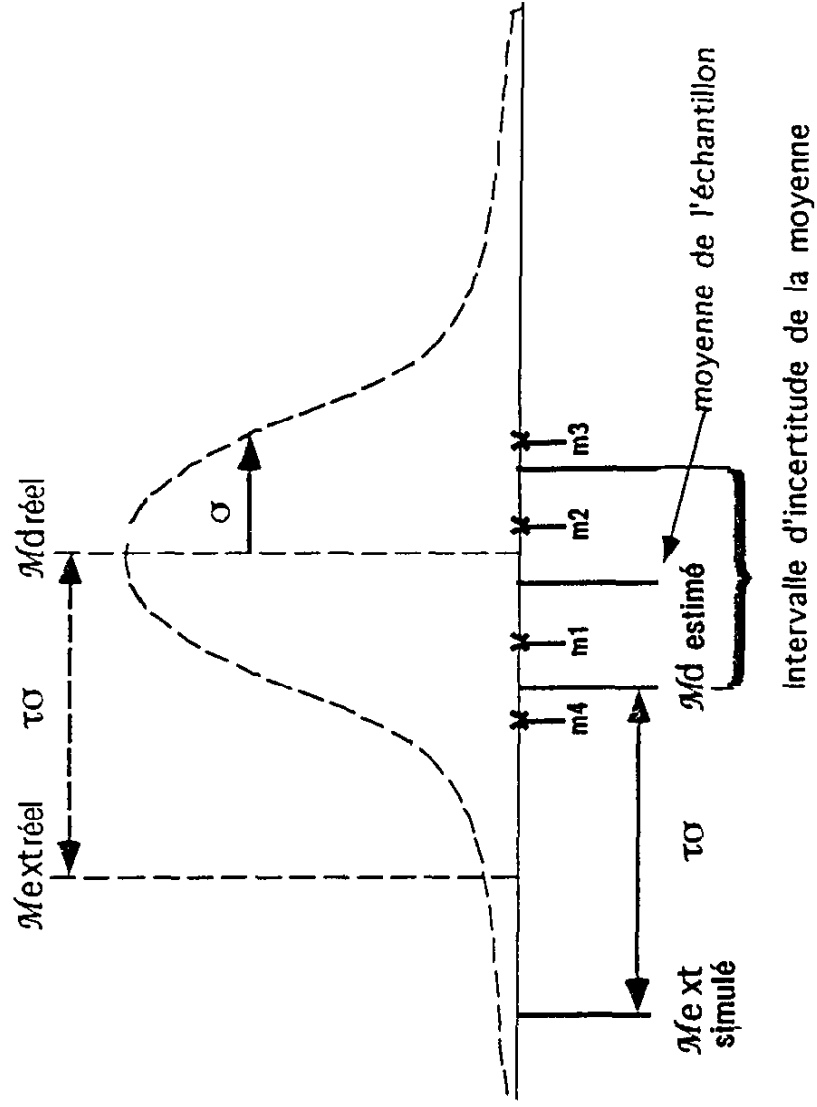
DECROCHAGE COMPRESSEUR HAUTE PRESSION



DETERMINATION DU MOTEUR MOYEN

RISQUES CLASSES :

- DECROCHAGE COMPRESSEUR H.P.
- DECROCHAGE COMPRESSEUR B.P.
- BLOCAGE DEVISSAGE



Pour obtenir le moteur représentatif du moteur extrême , on règle m4 de telle sorte qu'il coïncide avec $M_{extsimulé}$

BON DE VOL M 88

DETERMINATION DU MOTEUR MOYEN

RISQUES TRIÉS :

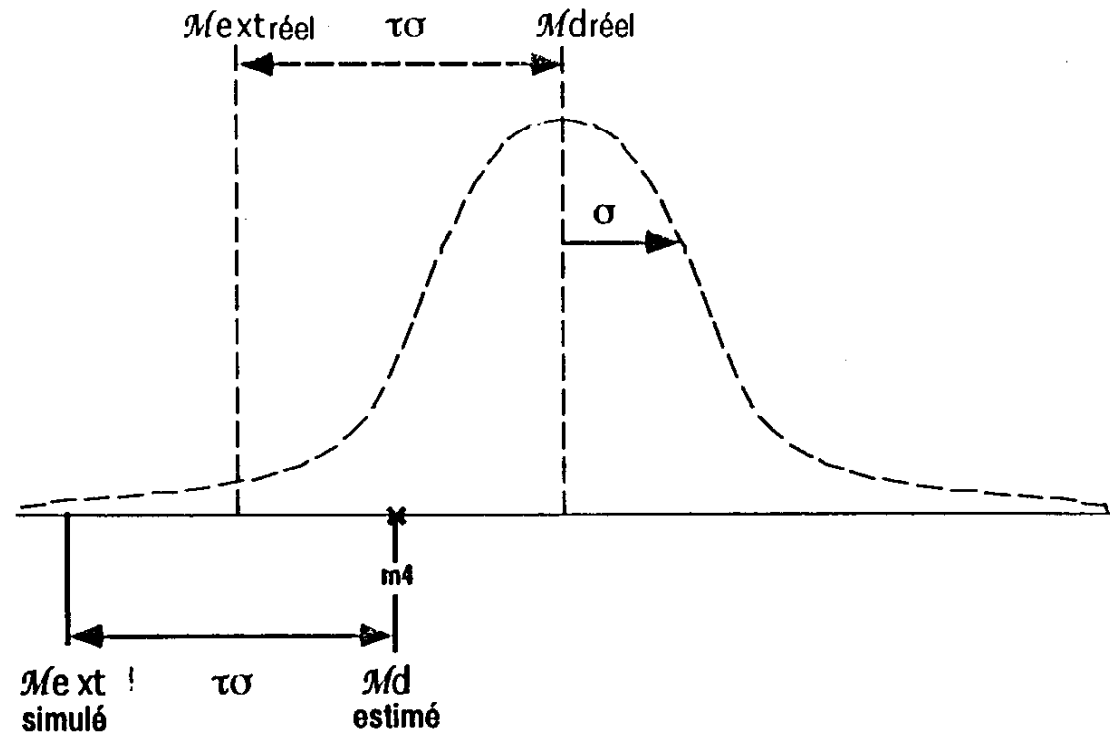
- EXTINCTION CHAMBRE
- RALLUMAGE REDEMARRAGE
- EXTINCTION P.C
- NON ALLUMAGE P.C.

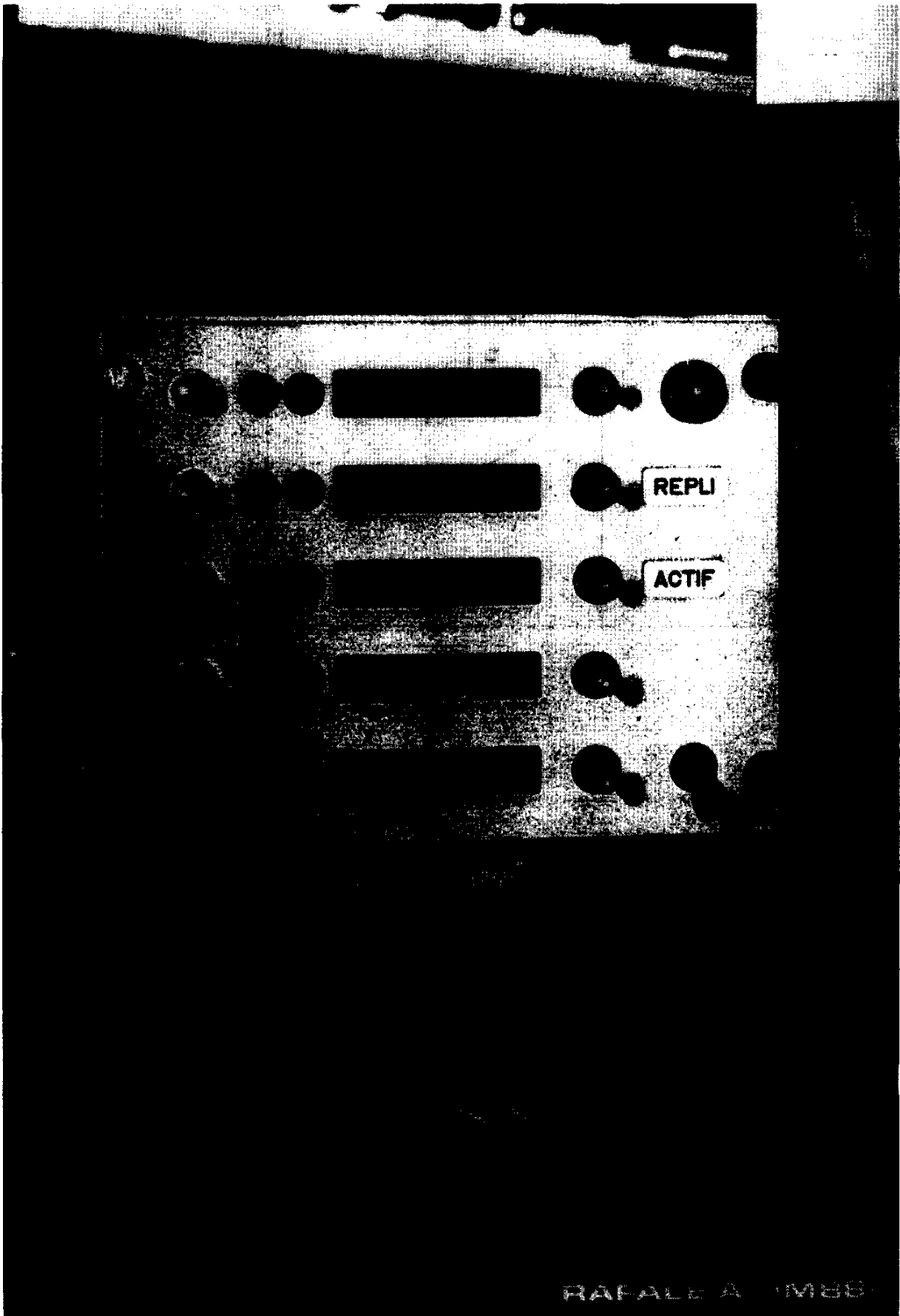
résultat du tri :

$$m4 < m2 < m1 < m3$$

$m4$ =moteur le plus défavorable

Pour obtenir le moteur représentatif du moteur extrême , on dérègle $m4$ de $\tau\sigma$ telle sorte qu'il coïncide avec \mathcal{M}_{ext}





RAFALE A M88