



Quel avion est l'Airbus A400M ?

BENOÎT G. MARINUS

Le capitaine-commandant Dr Ir Benoît G. Marinus est chargé de cours militaire au sein du département Mécanique de l'École royale militaire. Sa recherche est centrée sur l'aérodynamique et l'optimisation dans un environnement multidisciplinaire.

De studie van het transportvliegtuig Airbus A400M in een aerodynamische context brengt een aantal bijzonderheden aan het licht ten opzichte van zijn rechtstreekse concurrenten en nuanceert enkele van de verkoopargumenten. Veel meer dan alleen een rivaal van de C-130 in zijn laatste versie, is de A400M een vliegtuig uit een heel andere categorie. Door zijn uitgesproken polyvalentie en de daaruit voortvloeiende, moeilijke keuzes tijdens de ontwerpfase, is het een uniek toestel, waarvan de prestaties helaas in het gedrang komen door de gemaakte compromissen. Toch bewijst de harmonieuze combinatie van die uiteenlopende vereisten in één enkel vliegtuig het technologische vernuft achter dit toestel.

Les origines de l'A400M remontent au *Future Transport Aircraft* des années 1990, bien avant le lancement officiel de son programme par l'OCCAR en 2003. Fruit d'un programme industriel résolument européen, l'A400M est présenté par *Airbus Defence and Space* comme l'avion de transport lourd du XXI^e siècle. Sa versatilité en fait un appareil multimission, remplaçant ainsi différents types d'appareils par une seule et même plate-forme. L'A400M est capable aussi bien de vols tactiques vers des pistes peu préparées et disposant de peu d'équipements de manutention au sol que de vols stratégiques à longue distance et à haute vitesse, voire de ravitaillement en carburant en vol à faible vitesse. Le constructeur met en avant une série d'arguments techniques pour mettre en évidence l'avantage de l'A400M sur ses concurrents. Mais ces chiffres révèlent-ils une évolution ou une révolution ?

L'analyse scientifique sert, entre autres, à compléter les différentes phases de la prospection militaire en dressant le panorama des ressources possibles pour

réaliser une capacité donnée. Elle permet d'identifier les (dés)avantages technologiques d'un candidat par rapport à ses concurrents et de distinguer l'évolution technologique de la révolution annoncée par un constructeur. Véritable synthèse d'une veille technologique détaillée, l'analyse scientifique contribue ainsi à offrir une vue d'ensemble précise et circonstanciée aux gestionnaires et aux décideurs.

Un récent examen des avions de transport militaires équipés de turbopropulseurs¹ permet de fournir une analyse détaillée de l'A400M face à ses concurrents et de distinguer ses avantages technologiques réels de l'argumentation commerciale. Au total, dix-huit types d'avion de transport à turbopropulseurs figurant dans l'inventaire actuel des forces aériennes ont fait l'objet d'une analyse. Le Boeing C-17A, bien qu'équipé de turbofans, est également pris en considération à titre indicatif.

LES MASSES ET LES DIMENSIONS DU FUSELAGE

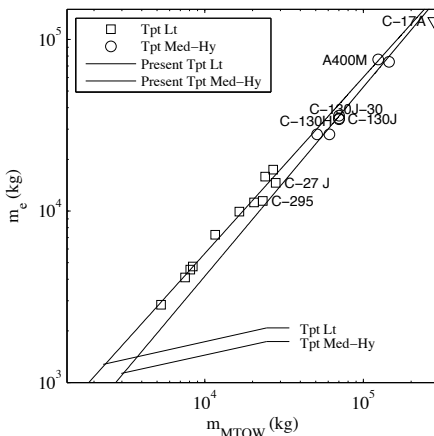


Figure 1. Relation entre masse à vide (m_e) et masse maximale au décollage (m_{MTOW}). Les lignes « - » indiquent la tendance constatée pour les avions de transport. Les transporteurs légers ont une masse maximale au décollage n'excédant pas 30 t, les transporteurs moyens entre 30 t et 75 t et les transporteurs lourds au-delà de 75 t.

Les dimensions de soute et la charge maximale de l'A400M, reprises au tableau 1 ci-après, en font un appareil particulièrement adapté au transport de charges lourdes et/ou surdimensionnées. 30 % de sa structure² est composé de matériaux composites, qui se situent principalement dans les ailes, y compris pour la première fois les longerons, dans la queue, la rampe et les pales d'hélice. L'objectif de cet usage intensif est de réduire la masse à vide. Cependant, comme indiqué à la figure 1 ci-avant, la masse à vide de l'A400M est dans la droite ligne des autres appareils de transport dont 0 % à 20 % de la structure sont en composites. La masse à vide de l'A400M représente 54 % de la masse maximale au décollage, contre 48,8 % pour le C-130J et 51,2 % pour le C-130J-30. Pour chaque 1 kg de

la charge maximale pouvant être emporté, la masse à vide d'un A400M représente 2,1 kg contre seulement 1,8 kg pour un C-130H/J. L'avantage technologique offert par l'usage des matériaux composites est en fait entièrement compensé par l'effet de taille³, la masse des moteurs et l'installation des systèmes de protection et de manutention de charge (plancher renforcé, treuil, agenouillement du train d'atterrissage et une grue optionnelle). La masse des moteurs de l'A400M est 2,4 fois supérieure à celle du C-130J avec, dans les deux cas, un rapport puissance-masse moteur de l'ordre de 4,5 kW/kg, et 1,1 fois supérieure à celle de l'An-70 bien que celui-ci, grâce à l'utilisation d'hélices contrarotatives avancées, ait un rapport record de 6,2 kW/kg.

Tableau 1. Caractéristiques opérationnelles en masses et dimensions.

	A400M	C-130J	C-130J-30	C-27J	C-295	C-17A
Charge maximale (t)	32	18,9	19,9	9	7	75
Volume de soute (m ³)	340	129	171	58	56,8	591,8
Nombre de palettes ⁴	7+23 ⁵	5+1 ⁵	7+1 ⁵	3,5	4+1 ⁵	12+6 ⁵
Dimensions contraintes (l x h)(m)	4,00x3,85	3,12x2,74	3,12x2,75	2,45x2,25	2,36x1,90	5,49x3,96

L'analyse de la longueur de fuselage ventilée en fonction de la masse maximale au décollage (fig. 2) démontre que les avions militaires de transport se distinguent des avions à usage civil par un fuselage court mais large, avec pour l'A400M 4 m de section cargo afin d'accommoder des charges de grande taille. L'A400M offre cependant une longueur de fuselage considérable par rapport à son concurrent occidental, le C-130J, fruit d'un design plus ancien et sensiblement plus court afin d'assurer de bonnes performances sur piste courte, particulièrement lorsque les marges de sécurité sont réduites en temps de crise, mais qui est dès lors limité à un peu plus de la moitié de la charge d'un A400M.

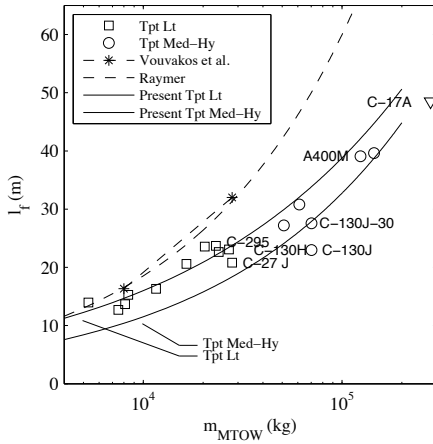


Figure 2. Relation entre longueur du fuselage (l_f) et masse maximale au décollage (m_{MTOW}). Les corrélations^{6,7} indiquent les tendances issues de la littérature pour avions civils équipés de turbopropulseurs.

Cette caractéristique explique d'ailleurs le succès de la version allongée C-130J-30 qui correspond à la longueur idéale d'un avion de cette masse (fig. 2) avec un volume logistique intéressant mais au détriment des performances de décollage court. Si besoin est, Lockheed est disposé à développer une version élargie du C-130J-30 afin d'augmenter la section cargo rendue exigüe par l'évolution des véhicules de combat. Aujourd'hui, le C-17A répond déjà à ce besoin avec des dimensions internes généreuses en largeur, mais une hauteur limitative du même ordre que celle de l'A400M. De par leurs dimensions internes et leur charge maximale, seuls l'A400M et le C-17A peuvent prétendre répondre adéquatement au besoin de transportabilité des véhicules de combat dont la masse et le volume augmentent à chaque itération pour rencontrer les exigences de protection et accommoder un nombre croissant de systèmes embarqués.

Dans la catégorie des transporteurs légers, le C-295 et le C-27J offrent des alternatives intéressantes pour le transport de troupes ou de matériel palettisé. Si le C-27J offre la possibilité de transporter des véhicules de la catégorie du LMV, le C-295 ne permet que le transport de véhicules aux dimensions très restreintes et son plancher ne supporte que des charges modérées. Le C-27J est



pénalisé par son fuselage court qui réduit la possibilité d'emport de palettes, même si son plancher très renforcé accommode des charges lourdes. Le C-27J avec un rapport masse à vide sur masse maximale à 52,2 % est pénalisé par sa structure en aluminium héritée de son prédécesseur le G.222, tandis que le C-295 offre un rapport à 49,8 %.

La masse maximale de carburant représente environ 33 % de la masse maximale pour les appareils de transport légers et varie de 29 % pour le C-130J à 35 % pour l'A400M. Le C-130H culminait à 40,3 % avec ses réservoirs externes pour compenser une forte consommation mais au sacrifice de l'aérodynamique (avec une augmentation de 3 % de la quantité de carburant brûlée). Pour le C-17A, le rapport de 40 % traduit l'exigence d'une distance franchissable considérable et du rendement plus faible des turbofans.

LES DIMENSIONS DE LA VOILURE

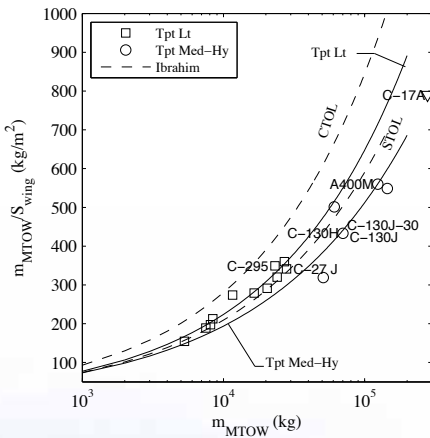


Figure 3. Charge alaire (rapport entre la masse maximale au décollage et la surface de l'aile S_{wing}) en fonction de m_{MTOW} ^{8,9,10}.



Les dimensions de la voilure sont principalement déterminées par la charge alaire désirée (rapport entre la masse maximale au décollage et la surface de l'aile) et les contraintes sur l'envergure issues de la compatibilité avec les infrastructures au sol et de la solidité de la structure de l'aile. La figure 3 illustre la charge alaire des avions de transport militaires en fonction de leur masse maximale au décollage. Une masse alaire faible est souhaitable pour des avions militaires à décollage court (STOL¹¹) par rapport aux avions conventionnels (CTOL¹²). La charge alaire élevée de l'A400M nécessite une structure conséquente qui tend à alourdir la masse de l'aile, mais qui favorise tant la manœuvrabilité que la réaction aux rafales de vent. Ceci permet à cet appareil de tout de même réaliser des vols de 930 km de et vers des pistes peu préparées d'environ 1000 m de long avec une charge de 25 t.

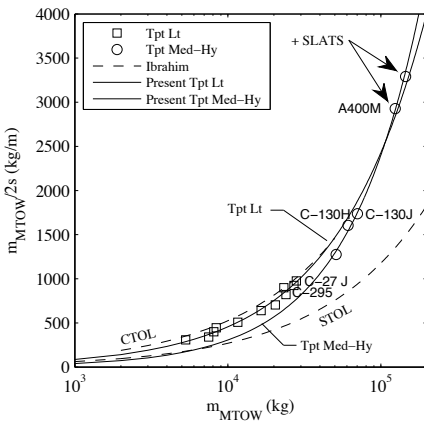


Figure 4. Charge par mètre courant d'envergure ($2s$) en rapport avec la masse maximale au décollage. Le C-17A culmine à 5550kg/m.

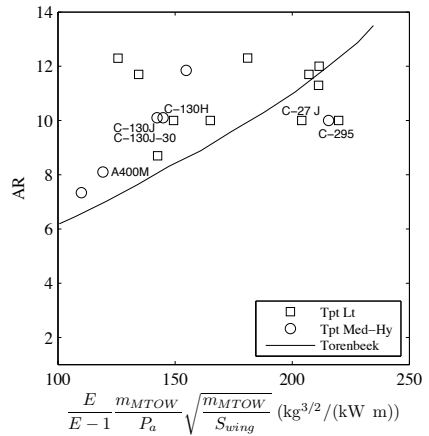


Figure 5. Finesse de l'aile (AR) en fonction d'un paramètre de performance en montée (E est le nombre de moteurs, P_α est la puissance cumulée des moteurs).

Toutefois, cette capacité requiert un train d'atterrissage principal adapté (douze roues et amortisseurs pour l'A400M contre quatre pour les C-130H/J), ce qui augmente la masse à vide de l'appareil. L'analyse détaillée montre que la charge alaire élevée est essentiellement liée à la masse maximale au décollage de l'A400M et, en particulier, à sa masse à vide. En outre, l'envergure de l'A400M étant essentiellement contrainte par la compatibilité avec des infrastructures au sol (l'envergure du C-130H est de 39,7 m, celle du C-130J de 40,1 m et celle de l'A400M de 42,4 m), la charge par mètre courant d'envergure est élevée, ce qui joue en défaveur de la longueur du décollage (fig. 4). Cet effet a dû être

compensé par l'ajout de dispositifs de haute sustentation sur les bords d'attaque, ce qui pénalise d'autant la masse à vide.

Un deuxième effet négatif de cette contrainte est que la finesse de l'aile de l'A400M est très faible (cf. fig. 5). Si ceci n'affecte pas sensiblement ses performances en montée grâce à un effort considérable quant à la puissance de ses moteurs (Pa sur la fig. 5) abordée plus loin dans cet article - comme déjà mentionné, cette puissance va de pair avec une forte augmentation de la masse des moteurs et pose un défi de fiabilité – la faible finesse de l'aile est néanmoins extrêmement pénalisante en termes de force de traînée induite (aussi traînée due au lift).

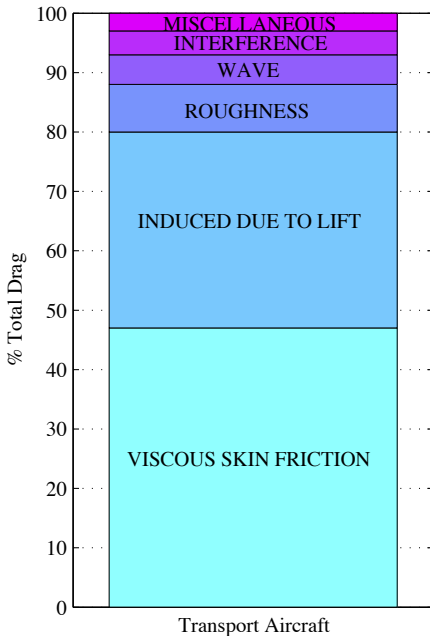


Figure 6. Contributions relatives à la traînée totale pour un avion de transport.

Cette force s'opposant au mouvement est en outre directement liée au poids de l'appareil. Deux éléments rendent donc la traînée d'un A400M considérable, d'autant que la traînée induite contribue à hauteur de 33 % de la traînée totale (cf. fig. 6). Airbus rapporte d'ailleurs l'utilisation intensive de techniques de simulation numérique pour réduire la traînée de l'aile. C'est en fait la répartition de la charge le long de l'envergure, mais aussi et surtout la traînée de frottement visqueux et la traînée d'onde (*wave drag*) due au vol de croisière à un nombre de Mach transsonique (0,72 pour l'A400M contre 0,52 pour le C 130H et 0,59 pour le C-130J) qui ont fait l'objet d'un effort conséquent afin de garder la traînée totale dans les limites de ce que la motorisation peut compenser. Ces efforts

résultent en des flux d'air très optimisés mais qui complexifient le largage de personnel et de matériel.

LA PROPULSION

Le groupe propulsif de l'A400M est constitué de quatre hélices à haute vitesse, couplées chacune à un turbomoteur. L'hélice offre une vulnérabilité réduite aux ingestions d'objets (*foreign object damage*), une inversion de poussée adéquate pour un atterrissage court ou des manœuvres au sol, ainsi qu'une réponse quasi immédiate en demande de puissance. La puissance du groupe propulsif de l'A400M est l'une des caractéristiques les plus singulières de cet avion. Comme l'indique la figure 7, sa puissance est inégalée dans le monde occidental et est, en fait, à la limite de ce qui peut être atteint avec une hélice à simple rotation. Les développements d'hélices contrarotatives de haute technologie pour la nouvelle génération d'avions moyen-courriers, et d'hélices à simple rotation à extrêmement haut rendement pour des avions court-courriers ne manqueront pas de multiplier les réalisations dans cette gamme de puissance.

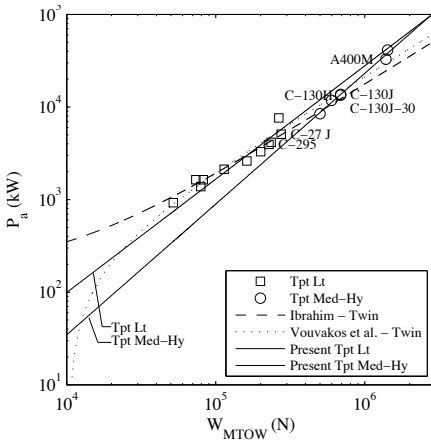


Figure 7. Puissance cumulée des moteurs en rapport avec la masse maximale au décollage.

Cette puissance est nécessaire en vertu de la masse et des dimensions de l'A400M afin de lui permettre d'assurer des missions aussi diverses qu'un vol long-courrier à haute altitude et haute vitesse – ce qui offre l'avantage de pouvoir intégrer plus facilement l'A400M dans le trafic civil – le largage de troupes ou de matériel à basse altitude et basse vitesse, les décollages courts sur terrain peu préparé ou encore le vol à vitesse réduite pour le ravitaillement en carburant d'hélicoptères.

La consommation spécifique de carburant par unité de puissance (*Power Specific Fuel Consumption – SFC*) est un paramètre clé qui influe sur la quantité de carburant à emporter pour réaliser une mission et, fatalement, également sur le coût opérationnel de l'appareil. Cette SFC, exprimée en kg de carburant par kW/h, traduit la quantité de carburant à brûler pour obtenir sur l'axe de l'hélice une unité d'énergie ; plus la SFC est basse, plus le moteur est efficace. Le tableau 2 est révélateur des efforts fournis par les motoristes de l'A400M pour augmenter le rendement du moteur et ainsi réduire la consommation. Depuis la première version du TP400-D1, dérivée du moteur Snecma M88-2 équipant le chasseur Rafale de Dassault Aviation, six itérations ont conduit au modèle opérationnel, à savoir le D6 ! En termes d'efficacité moteur, l'A400M fait un bond de géant comparé au vénérable C-130H. Malgré ces efforts, le besoin d'une puissance élevée a pour conséquence une consommation importante (cf. infra). Cela se traduit par un rapport de masse maximale du carburant (cf. tableau 2) très élevée par rapport au C 130J. Ce dernier n'est d'ailleurs que rarement équipé des réservoirs supplémentaires sous l'aile typiques du C-130H et de sa consommation élevée héritée d'un design vieillissant.

Tableau 2. Consommation spécifique de carburant par unité de puissance (*Power Specific Fuel Consumption*).

	A400M	C-130J	C-27J	C-295	C-130H
SFC (kg/KW/h)	0,38	0,41	0,48	0,46	0,54
Masse maximale du carburant rapportée à la masse maximale au décollage (en %)	36	30	34	33	30/42 ¹⁴

L'arrangement novateur des hélices de l'A400M, qui tournent en sens opposé sur chaque aile suivant le concept Down Between Engines (DBE), permet de préserver la symétrie de l'écoulement d'air autour de la voilure et des surfaces de la queue. Premièrement, ceci réduit le moment de lacet défavorable en cas de panne d'un moteur, et a donc permis de réduire de 17 %¹⁵ la surface de la dérive avec, à la clé, une réduction de masse et de traînée pour l'appareil.



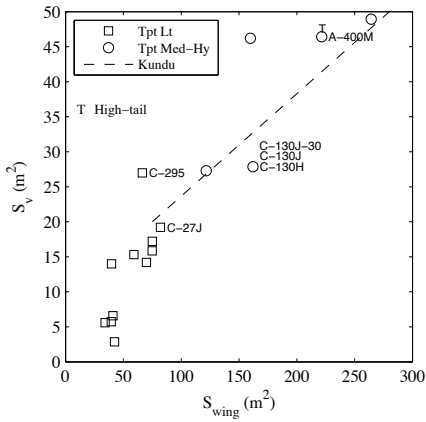


Figure 8. Surface de la dérive et de la gouverne de direction (S_v) comparée à la surface alaire.

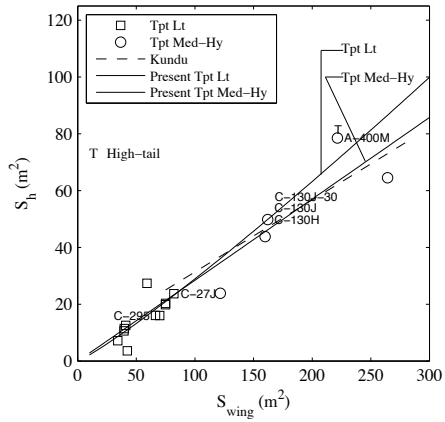


Figure 9. Surface de l'empennage horizontal et des gouvernes de profondeur (S_h) comparée à la surface alaire.

Cependant, comme le révèle la figure 8, les dimensions de la dérive de l'A400M restent conséquentes par rapport aux autres appareils. C'est essentiellement la puissance énorme des moteurs qui reste le facteur déterminant pour le dimensionnement de la dérive. Deuxièmement, le concept DBE permet d'améliorer sensiblement la répartition de la portance sur l'aile, ce qui a permis indirectement de réduire de 8 %¹⁵ la surface de l'empennage horizontal. Ici aussi, la figure 9 relativise cette diminution. Au-delà du concept novateur, le DBE est une absolue nécessité, malgré les inconvénients de deux boîtes de transmission distinctes, pour maintenir les masses et la traînée de l'A400M dans des valeurs acceptables.

LES MISSIONS ET L'EFFICACITÉ

Au-delà du design aérodynamique pur, il est important de situer l'A400M en termes de missions de transport – en l'occurrence, une mission consiste à considérer le transport d'une charge donnée (payload en lb¹⁶) sur une distance donnée (range en Nm¹⁷) – par rapport à ses concurrents. Ceci est illustré par l'enveloppe sur la figure 10 qui révèle qu'en se référant à notre ressource actuelle (le C-130H), l'A400M ou le C-295 et le C-27J sont des ressources extrêmement différentes. En termes de charge et de distance, l'A400M offre des possibilités inégalées pour un turbopropulseur et à mi-chemin entre celles d'un transporteur tactique tel que le C-130H/J et celles d'un avion transporteur stratégique tel que le C 17A.

Afin de chiffrer l'efficacité avec laquelle une mission de transport est accomplie, l'efficacité en charge-distance (*Payload Range Efficiency* – PRE) est utilisée. La PRE est une mesure de mérite obtenue en divisant le produit de la masse à transporter fois la distance à couvrir par la quantité de carburant consommée¹⁸. Pour un point dans la figure 10, soit une charge et une distance données, plus la PRE est élevée, plus petite est la quantité de carburant nécessaire pour effectuer cette mission. Les courbes iso-PRE sont illustrées par la figure 10 pour chaque type d'appareil. Il en ressort que pour les missions dont ils sont capables, le C-130H et encore plus le C-130J sont largement plus efficaces que l'A400M. Le C-130J constitue d'ailleurs une évolution considérable par rapport à son prédécesseur avec pour une mission de transport de 25000 lb sur 2000 Nm une consommation réduite de 25 %. L'A400M est ici fortement pénalisé par ses dimensions et ses masses qui résultent en une consommation excessive pour la gamme des missions accessibles au C 130J/H. Le même raisonnement se vérifie pour le C-17A dont la PRE est partout supérieure à l'A400M¹⁹. Cette consommation a un impact élevé sur le coût de fonctionnement. De l'autre côté de l'échelle, le C-27J et le C-295 sont des plates-formes de choix pour les petites charges, bien que le C-27J soit pénalisé par ses dimensions plus généreuses et sa masse à vide.

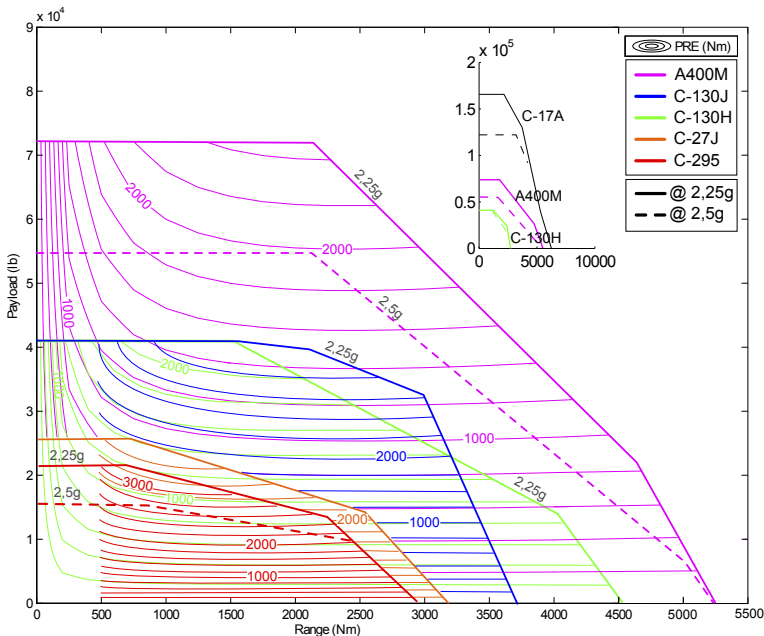


Figure 10. Diagramme charge-distance et efficacité en charge-distance (*Payload Range Efficiency* – PRE) de l'A400M, du C-130J, du C-27J, du C-295 et du C-130H.

Pour certaines missions, la masse totale de la charge excède les possibilités d'un seul C-130H. Dans ce cas, deux appareils doivent être engagés (ou bien l'appareil doit effectuer un aller-retour supplémentaire). Ce cas de figure est illustré par la figure 11 dans l'hypothèse la plus probable où la charge est répartie équitablement entre les deux appareils. Comme l'indique la figure 11, les capacités de l'A400M permettent d'effectuer la même mission avec un seul appareil, pour autant que les dimensions géométriques de la charge le permettent (cf. tableau 1). Dans ce cas, l'analyse de l'efficacité charge-distance tourne largement en faveur de l'A400M, sauf pour les missions de très courte distance où les deux types d'avion sont tout aussi efficaces. Dans le cas particulier des véhicules de combat qui ne peuvent être scindés par définition et dont la masse est en constante augmentation au point de dépasser la capacité du C-130H/J, l'A400M offrira une nouvelle capacité à la Défense qui doit aujourd'hui faire appel à ses partenaires ou à des contractants.

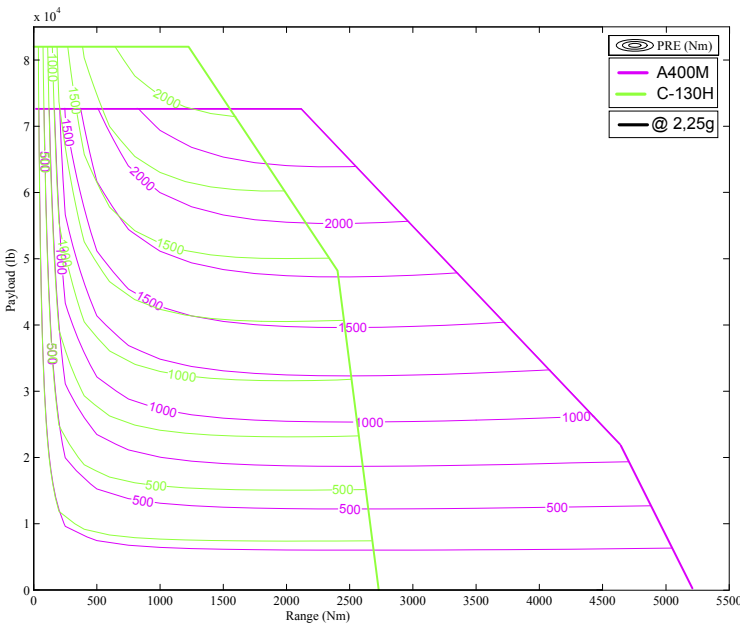


Figure 11. Diagramme charge-distance et efficacité en charge-distance (*Payload Range Efficiency – PRE*) d'un seul A400M, comparée à celle de deux C-130H transportant chacun la moitié de la charge (sans réservoirs externes).

CONCLUSIONS

116

L'A400M est un appareil particulièrement adapté au transport de charges lourdes ou de grandes dimensions sur de grandes distances. Sur cette exigence de base s'est greffée la nécessité d'excellentes capacités tactiques pour pouvoir réaliser une gamme de missions extrêmement large afin de satisfaire à l'ensemble des besoins des partenaires du consortium européen. Ces choix entraînent une série de compromis, tant d'un point de vue aérodynamique que structurel, dont une partie sert à compenser les effets défavorables des dimensions et de la masse à vide de l'avion. Au final, un avion de grande dimension reste un avion lourd, ce qui résulte inéluctablement en une consommation de carburant élevée. Celle-ci sera un facteur important dans le coût d'utilisation, en particulier si l'A400M est utilisé de façon extensive pour réaliser les missions actuellement confiées au C-130H. L'A400M excelle par contre pour les missions à longue distance ou celles qui nécessitent plus d'un C-130H vers une même destination.

Pour ces raisons, et cette étude le confirme si besoin en était, une coopération internationale au sein d'un organisme tel que l'European Air Transport Command (EATC) est une nécessité afin de disposer d'une large gamme d'appareils dans la flotte en vue de pouvoir faire appel à l'appareil le mieux adapté en taille et en masse à une mission. La mutualisation et le partage (pooling and sharing) se concrétise par l'intégration complète des avions de transport sous l'autorité de l'EATC, qui peut assigner le moyen le plus efficient pour chaque mission tout en mitigeant l'effet de la délocalisation des ressources par rapport au besoin de transport.

REMERCIEMENTS

L'auteur souhaite remercier le major aviateur Ir Denis Gochel, pilote d'essai pour les avions de transport de la Défense auprès de la DGMR Sys-A/T pour sa contribution personnelle à l'analyse ainsi que les lieutenants Cailteux, Peeterbroeck et Poppe pour leur contribution à la collation et l'analyse des données dans le cadre de leur travail de fin d'études.

□

Mots clés : A400M, Transport Tactique Aérien, Analyse Scientifique, Prospection Militaire

-
- ¹ "Data and Design Models for Military Turbo-propeller Aircraft", B.G. Marinus et J. Poppe, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 41, pp. 63-80, 2015.
- ² <http://militaryaircraft-airbusds.com>, consulté le 28Oct2014
- ³ Loi des carrés et des cubes (*square-cube law*) référant à l'augmentation plus importante du volume que de la surface pour une augmentation de longueur donnée. Ainsi, la charge maximale représente 24-27 % de la masse maximale pour un appareil de type A400M/C 130J contre 30-32 % pour la catégorie C-295/C-27J.
- ⁴ Palettes 463L au standard HCU-6E.
- ⁵ Sur la rampe.
- ⁶ "Lockheed looks to widen Hercules", S. Trimble, *Flight International*, 2008.
- ⁷ "FCS Vehicle Transportability, Survivability, and Reliability Analysis", C. Dion- Schwarz et al., *Institute for Defense Analyses*, 2005
- ⁸ "Selecting principal parameters of baseline design configuration for twin turboprop transport aircraft", K. Ibrahim, in *22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit*, no. AIAA 2004-5069, Providence (USA), 2004.
- ⁹ "Aircraft Design", A. Kundu, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2010.
- ¹⁰ "Synthesis of subsonic airplane design", E. Torenbeek, Delft University Press - Kluwer Academic Publishers, Delft (The Netherlands), 1982.
- ¹¹ STOL : Short Take-Off and Landing.
- ¹² CTOL : Conventional Take-Off and Landing.
- ¹³ "Aerodynamic technologies to improve aircraft performance", A. Abbas et al., *Aerospace Science and Technology*, Vol 28, pp 100-132, 2013.
- ¹⁴ Avec/Sans réservoirs extérieurs sous l'aile.
- ¹⁵ Chiffre annoncé par Airbus.
- ¹⁶ "On propeller installation effects with a Down Between Engines arrangement", B. Marinus, F. Hock, *International Review of Aerospace Engineering* 5 (3), pp. 94-100 (2012).
- ¹⁷ La livre (Pound) est l'unité aéronautique traditionnelle de masse (1 lb=0 ; 454 kg).
- ¹⁸ Le mile nautique (nautical mile) est l'unité aéronautique traditionnelle de distance (1 Nm=1,852 km).
- ¹⁹ $PRE=(m_{payload}^R)/m_{fuel\ burned}$ avec R la distance en Nm.
- ²⁰ "Relating & Comparing Operating Efficiencies of Civil Aircraft & Military Transports (Jets & Turbo-props)", Nangia R. K. et al., 27th International Congress Of The Aeronautical Sciences, 2010