

Hélicoptères à grande vitesse: l'aventure du X³

M. Philippe Roesch*



- 1. Les limitations en vitesse des hélicoptères actuels**
- 2. Les formules nouvelles à grande vitesse**
 - Les convertibles à rotors basculants "tilt-rotors"
 - Le "Advancing Blade Concept" de SIKORSKY
 - Les combinés avec aile et propulsion auxiliaire
- 3. Pourquoi augmenter la vitesse des hélicoptères ?**
 - Coût d'exploitation global (LCC) et Productivité
 - Missions et marchés potentiels des HGV
- 4. Le projet X³**
 - Le démonstrateur X³
 - Déroulement du programme
 - Application industrielle du concept H³
 - Facteurs clés de la réussite du projet

*Ancien directeur de l'Innovation Eurocopter

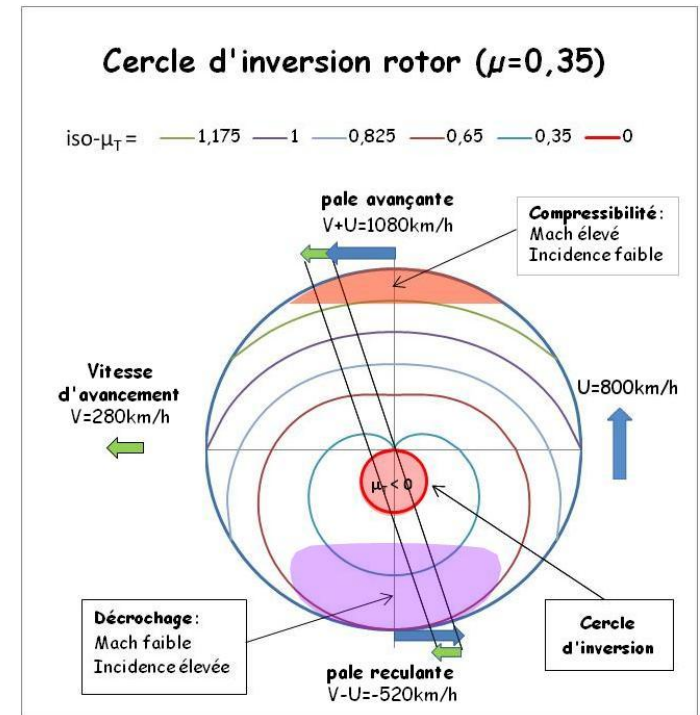
Conférence organisée par l'Académie de l'Air et de l'Espace au Palais de la Découverte, Paris, le 5 février 2014

Limitations en vitesse des hélicoptères actuels

- L'hélicoptère est avant tout un giravion capable de vol stationnaire
 - décollage et atterrissage vertical possibles à partir de terrains non préparés
 - Rotor principal:
 - assure la sustentation
 - bonne efficacité en vol stationnaire (faible charge au disque → rapport Poussée/Puissance élevé)
 - et la propulsion en vol d'avancement
 - disque rotor faiblement incliné vers l'avant de façon à équilibrer la traînée parasite de l'hélicoptère
- Fonctionnement asymétrique du rotor en vol d'avancement

→ Vitesse de croisière limitée à 250-300km/h:

1. La dimension du cercle d'inversion et le décrochage pale « reculante » ne permettent plus d'assurer la portance nécessaire tout en maintenant l'équilibre en roulis de l'appareil
2. La finesse du rotor se dégrade aux fortes assiettes à piquer du disque qui accompagnent les niveaux de traction élevés (aggravation du décrochage pale reculante)
3. L'écoulement à l'extrémité de la pale « avançante » devient transsonique (divergence de traînée du profil)



Les convertibles à rotors basculants

- En vol stationnaire les "*proprotors*" (propulseurs pivotants montés en bout d'aile) sont orientés verticalement de façon à diriger la poussée des rotors vers le haut.
- Au fur et à mesure que l'appareil acquiert de la vitesse, les "*proprotors*" sont progressivement inclinés vers l'avant jusqu'à atteindre un axe horizontal.
- A l'issue de la phase de transition l'aile fournit la totalité de la portance et l'appareil devient semblable à un avion bi-turbopropulseurs (fonctionnement axisymétrique des rotors).



Le V22 "Osprey" de BELL-BOEING

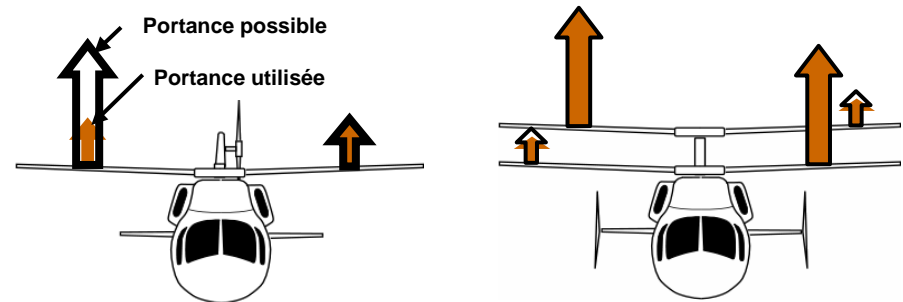


Le BA609 / AW609 de BELL-AGUSTA

- ✓ Vitesse de croisière élevée (faible traînée du fuselage de type avion)
- ✓ Portance assurée par les ailes en vol d'avancement (faible niveau vibratoire)
- ✗ Faible diamètre des rotors: mauvaises performances en vol stationnaire et en autorotation
- ✗ Forte vitesse induite en vol stationnaire rend l'atterrissage difficile sur terrains non préparés
- ✗ Phase de transition délicate lors du basculement des nacelles (corridor de conversion)
- ✗ Atterrissage impossible en mode avion
- ✗ Technologie complexe, faible indice constructif, coûts élevés

SIKORSKY « Advancing Blade Concept »

- Sustentation assurée par *deux rotors coaxiaux contrarotatifs rigides* dont les moments de roulis se compensent
 - sur un rotor articulé, le battement des pales assure l'équilibre en roulis des efforts de portance et la capacité de portance du rotor est donc limitée par la faible pression dynamique et le décrochage de la pale reculante
- Ceci permet d'augmenter la portance de la pale « avançante » de chaque rotor et d'assurer ainsi la totalité de la sustentation de l'appareil à grande vitesse (et ceci malgré la diminution du régime rotor)
- Propulsion assurée par un système auxiliaire (hélice à l'arrière sur X2), le rotor ne fournissant que la portance

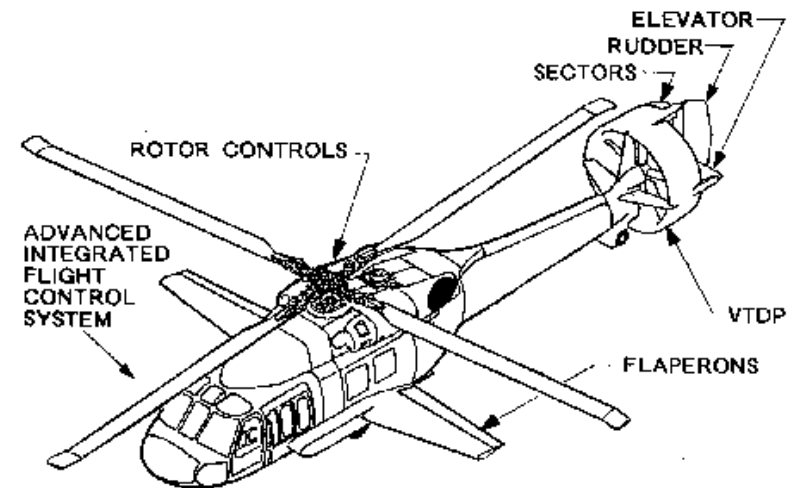


- ✓ Bonnes performances en vol stationnaire
- ✓ Compacité, maniabilité
- ✗ Traînée parasite importante de la tête rotor
- ✗ Charges dynamiques et vibrations élevées engendrées par les rotors rigides en vol d'avancement
- ✗ Posés sur pente limités (contraintes de flexion mât rotor)
- ✗ Fonctionnement dégradé de l'hélice propulsive dans le sillage du fuselage (sur le X2)
- ✗ Complexité mécanique et coût

Les combinés avec aile et propulsion auxiliaire (1/3)

Le démonstrateur X-49A "SpeedHawk" de PIASECKI

- La propulsion est assurée par une hélice carénée située à l'arrière de l'appareil et la fonction anti-couple est réalisée par poussée vectorielle grâce à des volets orientables placés à l'arrière de la carène d'hélice
- Cette machine a atteint la vitesse de 180kt mais son programme de développement a été arrêté en 2008

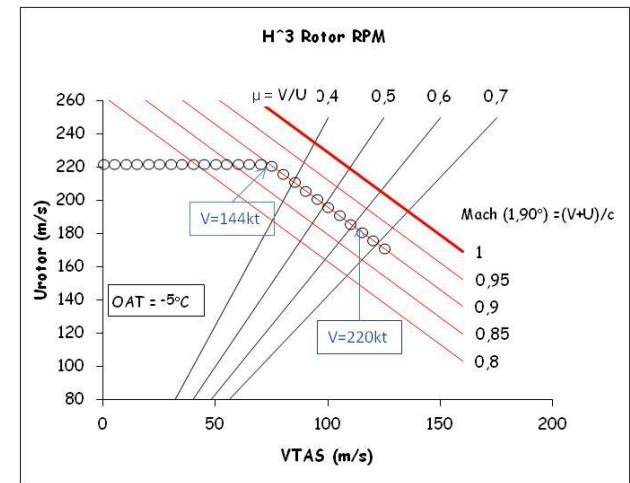
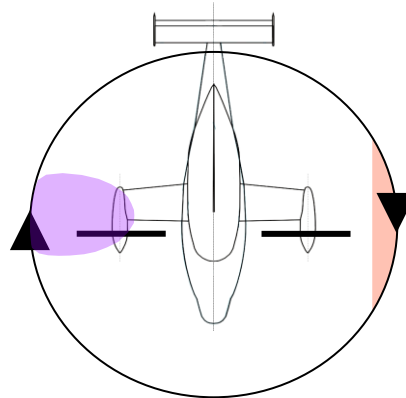


- ✓ Technologie simple
- ✓ Polyvalence de la plateforme
- ✗ Mauvaise efficacité de la commande de lacet en vol stationnaire et à la transition
- ✗ Fonctionnement dégradé de l'hélice dans le sillage du fuselage en vol d'avancement
- ✗ Problème d'architecture (masse élevée de l'hélice carénée et centrage arrière)

Les combinés avec aile et propulsion auxiliaire (2/3)

La formule H³ (High Speed Hybrid Helicopter) d'EUROCOPTER

- Le rotor et l'aile se partagent la portance à grande vitesse à parts sensiblement égales
- Deux hélices à pas variable assurent la propulsion en vol d'avancement
- Ces hélices assurent également l'anti-couple en vol stationnaire et le contrôle en lacet (par poussée différentielle) ce qui permet la suppression du rotor arrière
- Le rotor et les hélices sont entraînés mécaniquement par les moteurs via la Boîte de Transmission Principale (rapports de réduction fixes)
- Le régime de rotation du rotor est réduit aux vitesses élevées (~80% du NR nominal à 220 kt) de façon à éviter la divergence de traînée des profils à l'extrémité de la pale "avançante"
- L'aile de faible envergure décharge le rotor à grande vitesse afin de limiter le décrochage de la pale "reculante" aux paramètres d'avancement élevés ($\mu > 0,6$)
- Pas de gouvernes de type avion (le rotor assure seul le contrôle en roulis et tangage) mais simplement des volets réglables sur l'empennage horizontal et la dérive qui permettent d'ajuster l'équilibre appareil en vol de croisière.



Les combinés avec aile et propulsion auxiliaire (3/3)

La formule H³ (High Speed Hybrid Helicopter) d'EUROCOPTER



Gouvernes (5):

Rotor principal (3): pas collectif, + pas cyclique longitudinal (tangage) et latéral (roulis)

Hélices (2): pas moyen (propulsion TCL) et pas différentiel (lacet)

- ✓ Simplicité de l'architecture / faibles coûts
- ✓ Simplicité du pilotage
- ✓ Accélérations-décélérations et taux de montée-descente élevés
- ✗ Puissance nécessaire importante pour assurer l'anti-couple en vol stationnaire (mais marge de puissance élevée)

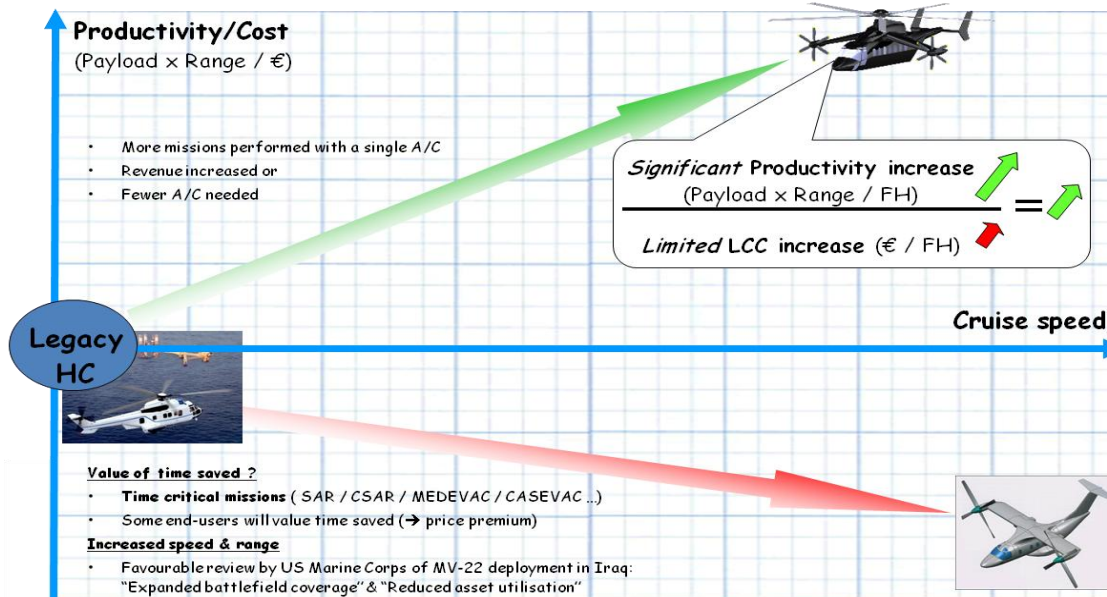
Pourquoi augmenter la vitesse des hélicoptères ?

1. Réduire les temps de mission: "gagner du temps"

- la valeur opérationnelle ou commerciale du temps gagné dépend des enjeux (variables selon le type de mission et l'opérateur):
 - transport de passagers civils ou de troupes de combat, soutien logistique, déserte de plateformes pétrolières "offshore", évacuation sanitaire, recherche et sauvetage en mer, secours en montagne, police, surveillance des frontières ou de zone de protection, travail aérien, escorte armée ...

2. Réduire les coûts de mission ...

- ... si l'augmentation relative du coût d'exploitation global (coûts fixes et coûts directs d'exploitation) est inférieure à l'augmentation de la productivité liée à la vitesse
- dans le cas contraire l'augmentation de vitesse ne compensera pas l'augmentation du coût d'exploitation → le marché potentiel risque d'être cantonné à un marché de niche constitué des seuls clients prêts à payer le prix pour obtenir la performance de vitesse.

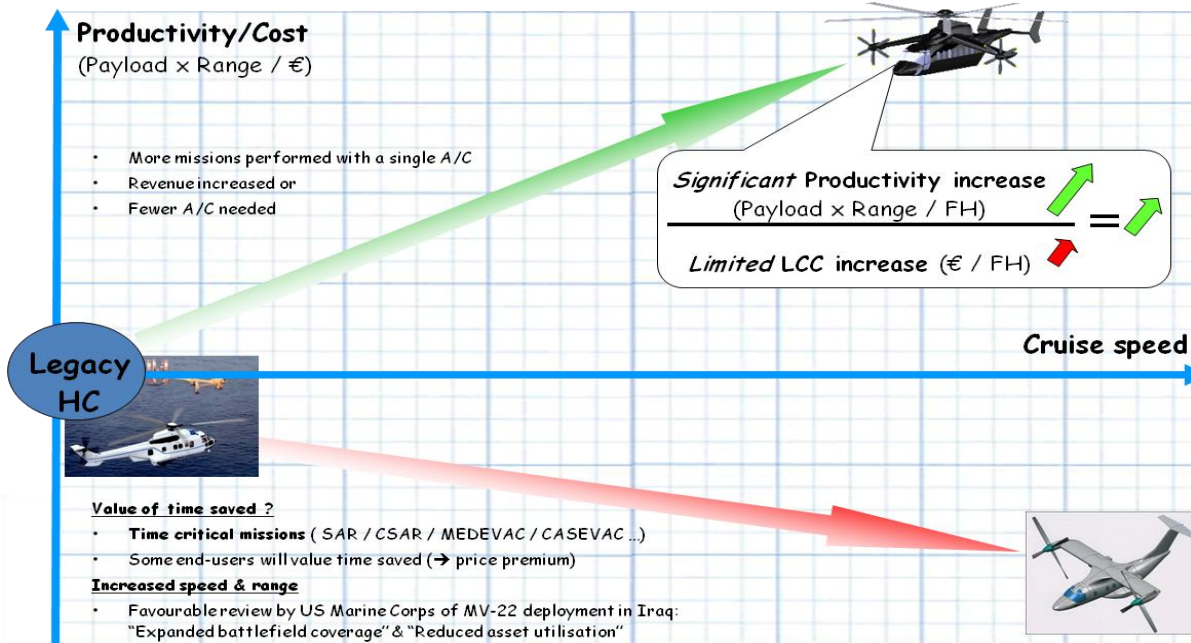
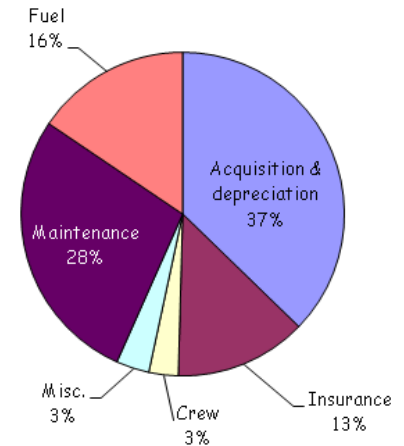


Coût d'exploitation global (LCC) et Productivité

$$\text{LCC (€/FH)} = \frac{\text{Acquisition \& Depreciation costs (€/year)} + \text{Fixed operating costs: Insurance, Crew, Misc. (€/year)}}{\text{Annual utilisation (FH/year)}} + \text{Maintenance cost DMC + Labour (€/FH)} + \text{Fuel \& Lubricants (€/FH)}$$

$$\text{Productivity Passenger transport (Pax.NM/FH)} = \text{Number of Pax} \times \text{Average speed (NM/FH)}$$

LCC Transport HC (19 Pax) * 1000 FH/year



Le projet X³



Ce projet, entièrement autofinancé, a été lancé (secrètement) en janvier 2008:

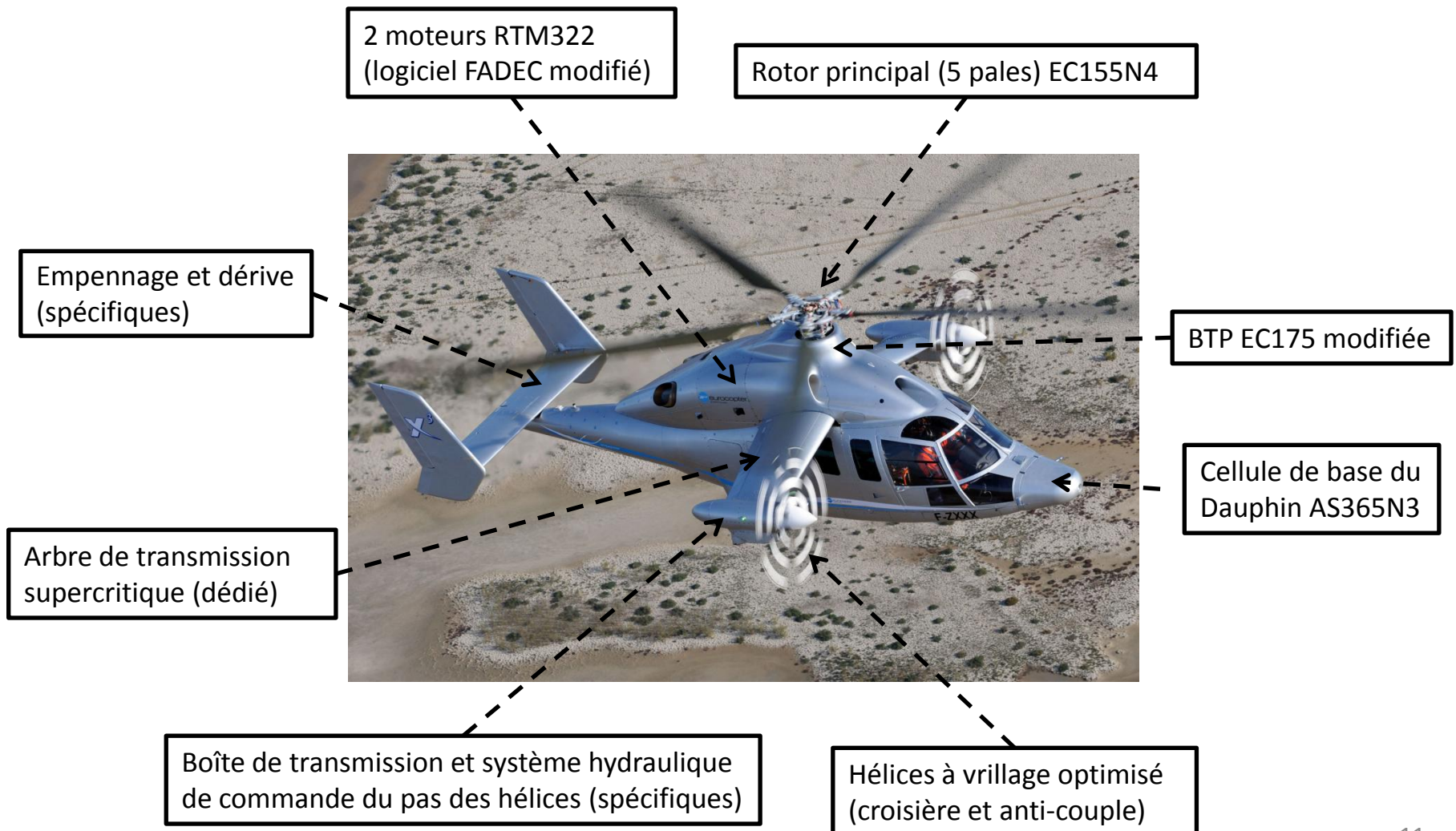
- afin de valider techniquement le concept H³ (stratégies de commande et de réglage de l'appareil, efficacité de l'anti-couple et du contrôle en lacet, propulsion, régulation moteur et gestion de la puissance...)
- d'évaluer ses performances, qualités de vol, charges et vibrations dans un domaine de vol élargi comparé à celui des hélicoptères conventionnels
- d'explorer différentes configurations d'équilibre afin de choisir la configuration optimale

L'effort de développement (coût et délai) a été minimisé:

- en réutilisant ou en adaptant chaque fois que cela était possible des composants existants provenant d'autres hélicoptères de la gamme Eurocopter
- à peine 2,5 ans se sont ainsi écoulés entre le lancement du projet et la mise en vol du démonstrateur
- et ceci pour une fraction infime du coût de développement d'un prototype classique

Le démonstrateur X³

Réutilisation ou adaptation d'éléments existants:



Déroulement du programme X³



- Afin d'assurer la **confidentialité** du projet l' équipe de développement est installée dans une zone protégée de l'établissement d'Eurocopter à Marignane et dotée de moyens matériels et humains dédiés.
- Un **permis de vol militaire** est sollicité pour le démonstrateur X³ et délivré par la DGA sous l'immatriculation F-ZXXX.
- Le 31 juillet 2010, la machine est transférée depuis l'établissement de Marignane, via l'étang de Berre, jusqu'à la base aérienne d'Istres dans un hangar loué par Eurocopter au CEV pour la phase d'essais en vol.
- **Le premier vol du X³ a lieu le 6 septembre 2010 au CEV d'Istres.**
- Le 27 septembre 2010, le démonstrateur est présenté à la presse.
- Le 29 novembre 2010, après une phase de mise au point de quelques semaines, l'appareil atteignait la vitesse de 180kt en palier stabilisé, objectif fixé pour la première phase des essais en vol
- Après un chantier de 3 mois consacré à la revalorisation et aux essais de qualification de la BTP, l'appareil reprend ses vols le 2 mai 2011 et dès **le 12 mai atteint la vitesse de 232kt** soit 430km/h en palier dépassant l'objectif de 220kt fixé pour ce programme.
- En juin 2011 le X³ participe au 49ème Salon international de l'aéronautique et de l'espace de **Paris-Le Bourget** où il effectue des démonstrations en vol quotidiennes.
- Durant l'été 2012 le X³ effectue une **tournée de démonstration aux Etats-Unis** dans le but de convaincre les clients potentiels, civils et militaires, de la pertinence des choix techniques et de la maturité du concept H³.
- Le X³ est de nouveau sous le feu des projecteurs pour sa première présentation en Allemagne en septembre 2012 à l'occasion du **Salon aéronautique ILA de Berlin.**

X³ établit un nouveau record de vitesse en palier à 255kt (472km/h)



Le 7 juin 2013, le X³, équipé d'un carénage de tête rotor optimisé minimisant la traînée parasite, établit un nouveau record de vitesse en palier à 255kt (472km/h) après avoir démontré 263kt (487km/h) en descente, le record précédent appartenant au X2 de Sikorsky qui avait atteint la vitesse de 250kt en palier le 15 septembre 2010.

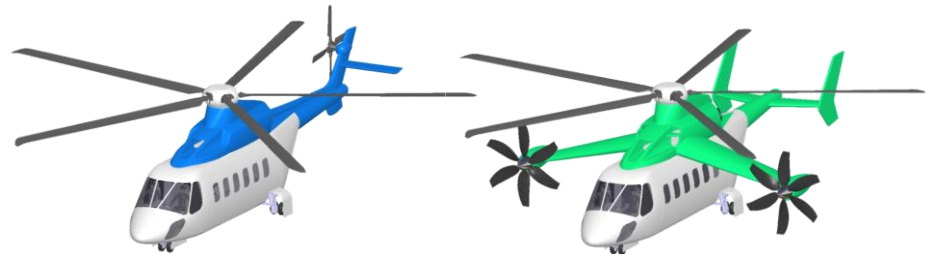


Application industrielle du concept H³ (projet)

- Bien que d'autres créneaux soient également possibles celui des **hélicoptères de transport de la classe 11-13T** paraît le plus adapté et cela pour plusieurs raisons:
 - **Grande vitesse** particulièrement adaptée au **transport de passagers** sur de **longues distances**
 - Taille optimale pour le transport de passagers (~19 pax, cabine haute)
 - Une machine plus lourde ne conviendrait pas à la desserte de plateformes « offshore »
 - La famille « SUPER PUMA » arrivant à la fin de son cycle de vie doit être renouvelée.
- **H³ offrira une vitesse de croisière élevée (220kt) à un coût « acceptable ».** Le gain de productivité lié à l'augmentation de vitesse (>50%) compensera largement l'augmentation modérée (<25%) des coûts d'acquisition et d'exploitation par rapport à l'EC225 → **Réduction des coûts de mission** (~ -20%)
- **Un concept de famille** original comprenant deux versions ayant au moins 70% d'éléments communs est proposé:
 - une **version de base** correspondant à la configuration hélicoptère standard (H1) successeur du Super Puma
 - une **version hybride H³ à grande vitesse**

Il permettra de:

- réduire les risques industriels et commerciaux liés au développement spécifique d'une version hybride à grande vitesse
- partager les coûts de développement et de production entre les deux versions
- réduire les coûts de formation des pilotes et du personnel de maintenance ainsi que le coût du soutien logistique
- élargir le marché potentiel en attirant de nouveaux clients vers l'offre combinée d'Eurocopter compte tenu de la synergie entre la version de base et la version hybride
- créer un élément de différenciation important vis à vis de la concurrence susceptible de placer Eurocopter dans une position de leadership durable sur ce segment de marché



Facteurs clés de la réussite du projet

- L'équipe de projet X³ s'est lancé un véritable défi en se fixant des objectifs ambitieux dans le domaine **technique** mais aussi en matière de **coûts** et de **délais** → Tous ces objectifs ont été atteints.
- Cette réussite tient beaucoup à l'**environnement favorable** créé autour du projet :
 - Equipe réduite regroupée dans une zone sécurisée d'accès limité, à l'écart du bureau d'études central
 - Grande autonomie de gestion dans tous les domaines (conception, fabrication, essais et **achats**)
→ rapidité dans la prise de décision et l'exécution des actions
 - Liberté dans le choix des partenaires et des fournisseurs (en fonction de leurs compétences et réactivité)
 - laboratoires universitaires pour certains travaux de conception (calculs CFD notamment)
 - petites entreprises innovantes pour la réalisation de pièces prototypes
- Elle résulte aussi de l'**acceptation du risque** qui développe l'esprit d'initiative et le goût d'entreprendre et qui, avec la passion et l'esprit d'équipe, conduit au dépassement individuel et collectif.
- **Un projet motivant**: en combinant la capacité de vol stationnaire des hélicoptères et la vitesse de croisière élevée des avions à hélices pour un coût acceptable, le démonstrateur X³ a ouvert une **voie nouvelle** au futur développement des hélicoptères à grande vitesse.
- Le projet a eu un **impact médiatique** considérable contribuant à renforcer l'image de "leader" d'Eurocopter dans le domaine de l'innovation.
- L'équipe X³ a reçu le Grand Prix de l'Innovation EADS en 2011 et le prestigieux Howard Hughes Award décerné par l'American Helicopter Society en 2012.



Lien vers vidéo X³ le Bourget

