

1.8. Genèse et évolution de l'hélicoptère

1.8.1. Les visionnaires

Parmi les innombrables dessins et croquis du génial visionnaire Léonard de Vinci, on trouve celui d'un appareil volant dont la sustentation est assurée par une surface hélicoïdale en rotation autour d'un axe horizontal. Le premier engin à voilures tournantes capable de s'élever par ses propres moyens fut présenté à l'Académie des Sciences, à Paris, en 1784. Ce n'était qu'un modeste appareil, de la dimension d'un jouet. Cependant, un an à peine après la démonstration des frères Montgolfier sur des appareils plus légers que l'air et 64 ans avant le vol d'une maquette d'avion, effectué en 1848 par le Britannique Stringfellow, on montrait qu'il était désormais possible de réaliser un engin, plus lourd que l'air, capable de décoller par ses propres moyens.

C'est Ponton d'Amécourt qui inventa le mot « hélicoptère ». Il écrivit en 1863 : « Hélicoptère signifie ailes en hélices. L'hélice progresse dans la direction de son axe : si l'axe est vertical, elle progressera verticalement... ». D'Amécourt réalisa une petite maquette avec deux hélices, tournant en sens inverses, entraînées par une petite machine à vapeur avec chaudière en aluminium. Bien que la force de sustentation ne put dépasser le quart du poids de cette maquette, d'Amécourt prédit : « le vol de l'hélicoptère sera possible demain ».

1.8.2. Les précurseurs

C'est ce que démontra l'Italien Enrico Forlanini à Milan en 1877 : il fit voler pendant une vingtaine de secondes un modèle de 8 kg muni d'un moteur à vapeur d'un quart de cheval. En 1887, le Français Gustave Trouvé réalisa un modèle sustenté par un moteur électrique (la source d'énergie électrique restait au sol).

En 1904, le Colonel Charles Renard essaya un modèle ayant deux rotors latéraux mus par un moteur à explosion, mais la sustentation était insuffisante pour permettre le décollage. C'est un modèle à deux hélices coaxiales que l'ingénieur Léger réalisa en 1905. La même année, au parc de Saint-Cloud (Paris), les frères Dufaux soulevèrent une machine de 17 kg équipée de deux rotors, de diamètre 2 m avec 4 pales chacun, entraînés à 250 tours/minute par un moteur de 3 CV.

L'année 1907 peut être considérée comme l'année de naissance de l'hélicoptère avec :

- le gyroplane n° 1, construit par les Français Louis et Jacques Bréguet, avec l'aide du professeur Charles Richet. Cet appareil, pesant 578 kg, était sustenté par quatre rotors actionnés par un moteur Antoinette de 45 CV ; piloté par l'ingénieur Volumard, il se souleva de 1,5 m le 29 septembre 1907.

- l'appareil du mécanicien Paul Cornu, à bord duquel celui-ci réussit à se soulever de 0,3 m le 13 novembre 1907. Cet appareil comportait deux rotors contra-rotatifs, en tandem, mus par un moteur Antoinette de 24 CV. Il s'agissait du premier décollage libre d'un hélicoptère, car le gyroplane Bréguet-Richet n'avait pas été lâché par les quatre personnes chargées de le guider ou de le retenir.

En 1912, le Danois Ellehammer fit soulever à 0,6 m un appareil piloté comportant, outre deux rotors contra-rotatifs coaxiaux, une hélice à axe horizontal. Le moteur (6 cylindres en étoile) avait une puissance de 36 CV.

D'autres appareils furent réalisés, notamment par Luyties, aux États-Unis, en 1907, et par Igor Sikorsky, en Russie, en 1909. Ces appareils ne purent décoller en raison de la trop faible valeur du rapport puissance du moteur/poids total de l'appareil, ainsi que des faibles performances aérodynamiques des rotors.

Le fonctionnement aérodynamique des rotors était imparfait en raison de la forme rudimentaire des pales ainsi que de l'importance des traînées parasites. Le gyroplane de Bréguet-Richet était doté de rotors de grande surface, ce qui était très avantageux. En outre, Louis Bréguet comprit, dès 1908, la nécessité d'articuler les pales, en battement et en traînée, sur le moyeu : ceci constituait une innovation majeure, essentielle pour le bon comportement aérodynamique et vibratoire des rotors d'hélicoptère. Toujours en 1908, Louis Bréguet, en collaboration avec Richet, construisit un appareil triplan avec deux rotors latéraux de 8 pales chacun. Cette sorte de combiné ne parvint pas à décoller.

La guerre 1914-1918 marqua une pause dans le développement des hélicoptères, alors qu'elle engendra un essor remarquable pour les avions.

1.8.3. Les pionniers

C'est au début des années 20 que furent réalisés les premiers hélicoptères réellement capables de voler.

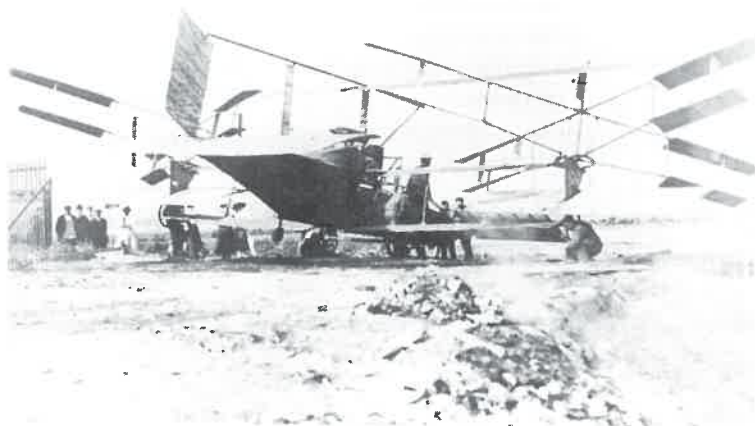
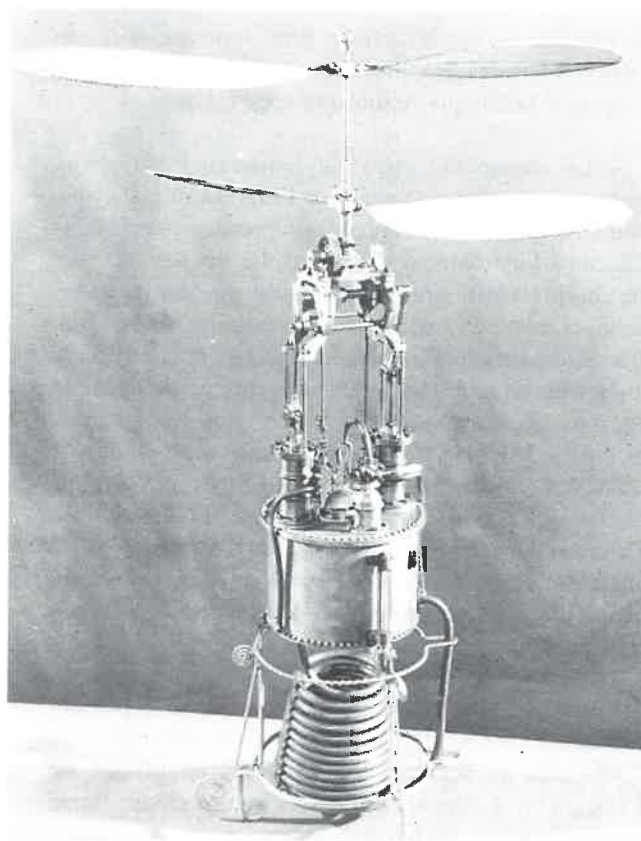
- l'Argentin Raoul Pateras Pescara, marquis de Casteluccio, mit au point, de 1920 à 1922, un appareil à deux rotors coaxiaux qui marquait des avancées majeures telles que :

- la variation cyclique d'incidence par torsion des pales ;
- la variation du pas général ;
- la possibilité d'atterrissage en autorotation (cette possibilité était baptisée par son inventeur « coup de frein Pescara »).

À noter que Pescara rendit hommage à Charles Renard qui avait démontré, quinze années plus tôt, que l'hélicoptère pouvait s'élever avec des moteurs de l'époque, pesant moins de 4 kg par cheval. Les essais

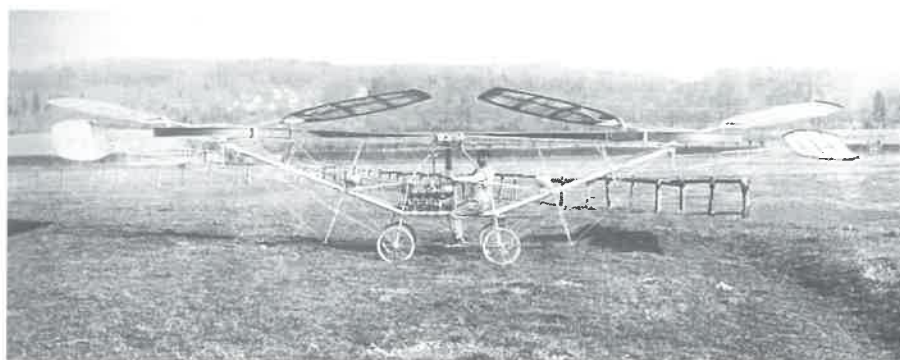
Précurseurs de l'hélicoptère

Modèle réduit d'hélicoptère à vapeur du
Vicomte de Ponton d'Amécourt (1863)



Triplan à deux rotors latéraux de huit pales chacun
réalisé par Louis Bréguet et Charles Richet en 1908

Hélicoptère Paul Cornu à deux rotors
contra-rotatifs en tandem (1907)



Photos : Historique de l'hélicoptère, J. BOULET

de Pescara furent effectués, pour leur majorité, en France, à Issy-lès-Moulineaux, avec l'aide financière de la Section Technique Aéronautique de l'Armée.

– Le Russe Georges de Bothezat, exilé aux États-Unis, réalisa sur contrat de l'Engineering Division of the Air Service, un appareil comprenant quatre rotors (chacun à l'extrémité d'une croix). Le pas des six pales de chaque rotor était commandé par un manche. Celui-ci assurait la commande en tangage par la variation différentielle du pas des rotors avant et arrière, et la commande en roulis par la variation différentielle du pas des rotors latéraux (à gauche et à droite). Cet appareil, qui pesait 1610 kg, était équipé d'un moteur Rhône de 180 CV. Le 18 décembre 1922, il effectua un vol à une hauteur de 1,5 m à 2 m, pendant 102 s, sur une distance d'une centaine de mètres. L'appareil était piloté par le Major américain Bane qui effectua ainsi le premier vol au monde d'un hélicoptère, devant témoins, pendant plus d'une minute.

– Le Français Étienne Oehmichen réalisa le premier vol stationnaire de plus de 5 minutes, en mai 1923, sous le contrôle du Service Technique Aéronautique. Le 4 mai 1924, il effectua le premier vol en circuit fermé d'un kilomètre (seize ans après l'exploit d'Henri Farman sur un avion des frères Voisin). La hauteur maximale au cours de ce vol fut de 16 m.

À noter qu'Étienne Oehmichen, à l'origine ingénieur à la Société Peugeot, devint professeur au Collège de France en 1939. Pendant longtemps, il continua de construire des hélicoptères qu'il pilotait lui-même. En 1937, ayant effectué plus de 2000 vols sur ses propres appareils, il estima que l'hélicoptère était, en vol stationnaire, un « dangereux appareil, tout particulièrement instable, constamment sous la menace de la rupture d'une des multiples pièces de son mécanisme hautement compliqué et chargé ».

Oehmichen concluait : « il existe une solution sûre qui consiste à combiner sur un même appareil les avantages du plus lourd et du plus léger que l'air : l'hélicostat. » Le principe en est fort simple : il s'agit d'un hélicoptère surmonté d'une enveloppe allongée remplie d'un gaz léger. Cette enveloppe a un triple rôle :

- stabiliser l'hélicoptère ;
- diminuer l'effort de sustentation demandé aux rotors ;
- freiner efficacement la descente en cas de panne.

C'est d'ailleurs avec un hélicostat qu'Oehmichen avait effectué ses premiers vols en 1921. Cette formule tomba dans l'oubli pendant près d'un demi-siècle. Elle fut remise à l'honneur, non plus pour des raisons de stabilité et de sécurité, mais pour la manutention de charges lourdes (projets de Pierre Balaskovic, Pierre Contensou et Jacques Bouttes).

Juan de la Cierva est l'inventeur de l'autogire. Il prouva en 1923 qu'un appareil à voilure tournante pouvait se poser en autorotation. Cette démonstration ainsi que l'adjonction d'amortisseurs de traînée à l'articulation des pales eurent un effet important sur le développement de l'autogire de 1924 à 1934, mais elles furent aussi très bénéfiques pour les hélicoptères. Cependant, la période 1924-1934 fut, pour les hélicoptères, une période de stagnation, par rapport aux autogires et surtout aux avions.

C'est à l'effort conjoint de Louis Bréguet et de René Dorand que l'on doit la réalisation, à partir de 1932, d'un gyroplane d'excellente qualité. Les améliorations furent liées non seulement aux progrès des moteurs d'aviation, mais aussi à la découverte de phénomènes propres aux appareils à voilures tournantes. Cette découverte fut surtout due à l'exploitation rationnelle d'essais au sol. Le gyroplane Bréguet-Dorand fut installé, en 1935, sur trois bascules qui permettaient de mesurer en trois points les efforts de sustentation, avec ou sans effet de gouverne. Cela permit de mieux comprendre la réponse de l'appareil aux ordres de pilotage. En outre, certaines commandes mécaniques furent remplacées par des commandes hydrauliques. Le Service Technique Aéronautique du Ministère de l'Air passa à Bréguet-Dorand un contrat comportant :

- une épreuve de maniabilité, autour d'un carré de 500 m de côté ;
- une épreuve d'altitude : monter à 100 m, au moins ;
- une épreuve de vitesse : voler à 100 km/h, au moins ;
- une épreuve d'endurance : voler pendant 1 heure, au moins ;
- une épreuve d'endurance en stationnaire pendant 10 minutes, au moins.

Toutes ces épreuves furent passées avec succès au cours de l'année 1936.

En 1938, René Dorand créa la Société française du gyroplane et commença la réalisation d'un nouvel appareil à rotors coaxiaux, le G 11. Malheureusement, ses travaux furent très ralentis pendant la deuxième guerre mondiale.

En Allemagne, les progrès de l'hélicoptère furent surtout dus au professeur Heinrich Focke qui avait fondé, en 1923, en association avec G. Wulf, la firme Focke-Wulf. Cette société produisit d'abord de petits avions, puis des autogires sous licence La Cierva. À partir de 1934, elle entreprit la réalisation d'un hélicoptère (F 61) avec deux rotors latéraux (rotors tripales) tournant en sens inverse. Ces rotors disposaient d'une variation cyclique longitudinale. La commande latérale se faisait par variation différentielle du pas général des deux rotors (c'était l'avantage principal de la formule à rotors latéraux, par rapport à celle à rotors coaxiaux). Le 26 juin 1937, cet appareil pulvérisa le record d'altitude du Bréguet-Dorand en

atteignant 2100 m. Le Focke F 61 fut le premier hélicoptère à réaliser des essais complets en matière de stabilité, performance et sécurité.

La formule de l'hélicoptère à deux rotors latéraux fut améliorée aux États-Unis par la Société Platt-LePAGE qui obtint, en 1940, un contrat de l'U.S. Army pour réaliser le XR1 (Expérimental Rotary-Wing Model Aircraft n° 1). D'une masse totale de 2300 kg, le XR1 se caractérisait par un fuselage, une voilure fixe et un empennage analogues à ceux d'un avion. Aux extrémités de la voilure fixe, deux rotors de 10 m de diamètre étaient entraînés par un moteur Pratt et Whitney R 985 de 450 CV. L'aérodynamique de l'ensemble de la cellule était bien étudiée pour le vol de translation. La transmission mécanique était exempte de vibrations. Le XR1-A effectua des essais prometteurs de 1941 à 1944, mais il souffrit de la compétition de la formule de l'hélicoptère à un seul rotor principal, développée par Igor Sikorsky sur un contrat de l'US Army, obtenu en décembre 1940.

Igor Sikorsky avait, en 1910, presque réussi à soulever son deuxième hélicoptère d'un poids de 180 kg, avec des rotors entraînés par un moteur Anzani de 25 CV. Mais il abandonna cette voie, considérant l'ampleur des problèmes restant à résoudre pour obtenir un appareil utilisable. En 1930, aux États-Unis, il déposa un brevet concernant un appareil VS 300 comportant un rotor principal à variation cyclique de pas, pour le contrôle longitudinal et pour le contrôle latéral, et un rotor auxiliaire à la queue, à axe horizontal transversal, pour équilibrer le couple dû au rotor principal et pour commander le lacet. Cet appareil fit son premier vol, piloté par Igor Sikorsky, le 14 septembre 1939. Il établit un record mondial d'endurance (1 heure 32 minutes 26 secondes), le 6 mai 1941. En fait, le VS 300 avait été modifié en remplaçant le contrôle cyclique du pas du rotor par la commande du pas de deux petits rotors montés à l'arrière, de chaque côté du fuselage. Ce n'est qu'à la fin de 1941 que le VS 300 vola de façon satisfaisante, avec le contrôle de pas cyclique du rotor principal.

Le Capitaine Frank Gregory, de l'US Army, essaya l'appareil : il fut très surpris de constater qu'en poussant le manche vers l'avant, l'appareil avançait, mais montait aussi, alors qu'il s'attendait à le voir descendre comme l'aurait fait un avion. Sous l'impulsion de Sikorsky, la firme United Aircraft réalisa, avec l'aide d'un contrat de l'US Army, un nouvel appareil, le XR4 ; destiné à l'observation, il devait avoir une charge utile de 250 kg. Le premier vol eut lieu le 14 janvier 1942. Le 20 avril 1942 fut un grand jour pour Igor Sikorsky : le XR4, piloté par Charles Morris, atteignit l'altitude de 1500 m et parvint ensuite à descendre jusqu'au sol, en autorotation. En fait, il avait échappé de peu à la catastrophe, car, ayant réduit le pas général, il perdit presque le contrôle de l'appareil qui subissait oscillations et vibrations. Celles-ci étaient dues aux anneaux tour-

billonnaires que l'appareil rattrapait au cours de sa descente quasi-verticale. Grâce à ses réflexes de pilote d'avion, Charles Morris se sortit de cette dangereuse situation en poussant sur le manche pour prendre de la vitesse et se retrouver ainsi en descente normale.

Ainsi, de 1940 à 1945, Sikorsky parvint-il à maîtriser, un à un, les problèmes liés à la mécanique du vol et au pilotage des hélicoptères. La formule à un rotor principal unique (rotor tripale) et un rotor de queue à axe transversal, avait montré l'étendue de ses possibilités.

Au cours de la même période 1940-1945, d'autres filières d'hélicoptères virent le jour aux États-Unis :

– Bell. À l'origine des hélicoptères Bell, il faut citer Arthur Young. Après des études en mathématiques et des essais de maquettes en soufflerie, il réalisa des modèles réduits mus par moteur électrique et pilotés à l'aide d'une télécommande à fils. Ce fut Young qui inventa la barre stabilisatrice qui permet au rotor de ne suivre qu'avec retard l'inclinaison du mât. Cette disposition introduit un terme d'amortissement dans les équations du vol stationnaire, telles qu'elles avaient été établies dans les années 30, suite aux travaux du français Maurice Lamé, dont l'ouvrage « Le vol vertical » avait fait autorité. En 1941, Arthur Young persuada le constructeur aéronautique Larry Bell de réaliser deux prototypes, l'un monoplace, l'autre biplace. Ceux-ci volèrent avec succès en 1943 et 1944. Un troisième appareil, qui tirait partie des enseignements acquis par ses deux prédécesseurs, donna naissance au Bell 47, qui fut certifié en 1946 et eut une brillante carrière commerciale.

– Piasecki. Excellent mécanicien, Frank Piasecki imaginait l'hélicoptère comme un véhicule populaire, rustique comme un Piper Cub. Il était hostile à la formule avec rotor de queue, en raison des risques d'accidents au sol. Après avoir essayé l'entraînement du rotor principal par éjection d'air en bout du fuselage, il y renonça en raison du retard à l'action du palonnier. Il fut ainsi conduit à la formule du birotor en tandem : le X HRP-X Dogship, commandé par l'US Navy, fit son premier vol le 7 mars 1945 : il était piloté par Frank Piasecki lui-même. Prévu pour transporter 10 passagers, avec un moteur Continental R-975 de 450 CV, il fut à l'origine de la filière Piasecki-Vertol, de gros hélicoptères birotor en tandem.

– Hiller. Âgé de 20 ans lorsqu'il fit voler son premier prototype, Stanley Hiller réunissait les qualités de l'inventeur, de l'ingénieur, du pilote d'essais et de l'homme d'affaires. En 1948, il fit certifier le Hiller 360, équipé d'un système de commande original, à la fois stabilisateur et servo-commande aérodynamique.

En 1945, à la fin de la deuxième guerre mondiale, la situation était la suivante :

- Sikorsky avait produit 580 appareils ;
- Bell avait achevé 3 prototypes, dont celui du Bell 47 ;

- Piasecki faisait voler le PV 3, birotor en tandem, à l'origine des « bananes volantes » ;
- Hiller avait réalisé le premier hélicoptère américain à rotors coaxiaux.

Bien que d'autres firmes américaines aient à l'étude des prototypes, ce furent les sociétés Sikorski, Bell, Piasecki et Hiller qui s'imposèrent. À celles-ci, il faut ajouter la société Kaman, créée en décembre 1945. Charles Kaman fut le seul constructeur à produire, en série, des appareils à rotors « engrenants ». Cette formule, qui avait été explorée par Flettner et par Kellett, présente l'avantage de ne pas exiger un rotor arrière. Kaman innova en commandant l'incidence des pales par des volets disposés vers les extrémités de celles-ci. Les efforts de commande devenaient ainsi beaucoup plus faibles. Les appareils Kaman constituèrent d'excellents hélicoptères-grues. Par contre, leur vitesse d'avancement était trop limitée par la traînée aérodynamique des pylônes et moyeux des rotors.

Au cours de la deuxième guerre mondiale, l'Europe avait consacré l'essentiel de son effort aéronautique aux avions et aux missiles. Elle avait donc pris, dans le domaine des hélicoptères, un retard considérable par rapport aux États-Unis.

Ce retard était particulièrement ressenti en France, où, grâce à Bréguet et à Cornu, avaient eu lieu les premiers essais d'envol d'appareils à voilure tournante. Roger Garry créa, dès août 1944, la section « Voilures tournantes » au Service Technique de l'Aéronautique du Ministère de l'Air. Titulaire du brevet français n° 1 de pilote d'hélicoptères, il fut à l'origine d'un renouveau, en France, qui fut marqué par :

- la mise à profit, par René Dorand et par Louis Bréguet, de leur expérience acquise avant 1939. René Dorand présenta au sol en 1946, au premier Salon de l'Aéronautique d'après guerre, le NC 2001 à deux rotors engrenants. Louis Bréguet réalisa, en 1948, le Bréguet type III à deux rotors coaxiaux.

- l'étude d'appareils de conception différente. Ce fut le cas du N 1700 avec rotor bipale, muni d'une barre stabilisatrice. La tête rotor était montée sur un parallélogramme articulé qui pouvait être déplacé latéralement. Cette conception, due à André Bruel, permettait de s'affranchir de la commande cyclique, pour le contrôle latéral. De son côté, la SNCASE (Société Nationale de Constructions Aéronautiques du Sud-Est) réalisait le SE 3101 avec un seul rotor principal, mais avec deux rotors de queue, aux extrémités d'un empennage en V : la variation différentielle du pas de ces rotors engendrait un mouvement de lacet, alors que leur variation dans le même sens produisait un mouvement de tangage. La variation cyclique du pas du rotor principal n'était utilisée que pour le contrôle en roulis. Cette formule avec deux rotors arrière en V fut reprise pour le SE 3110, appareil biplace à fuselage profilé.

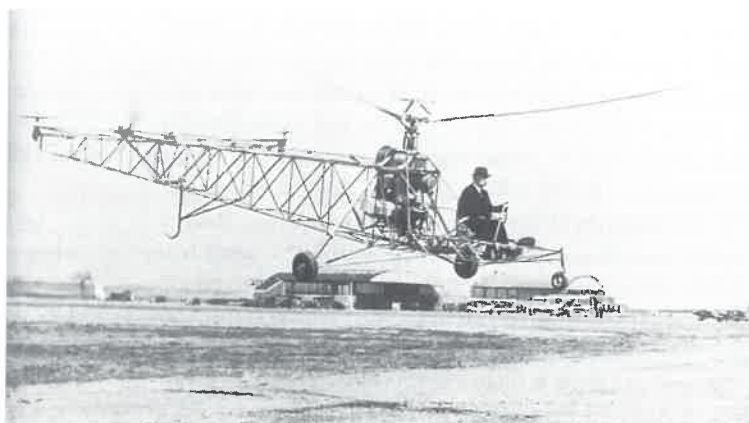
Le SE 3110 était le premier hélicoptère purement français réalisé par la SNCASE. Conçu par une équipe animée par René Mouille, il était mû par un moteur Salmson de 200 CV. Jacques Lecarme effectua le premier vol le 10 juin 1950. Cet appareil fut suivi par le SE 3120, Alouette I, qui différait du SE 3110 par le remplacement des deux rotors de queue par un rotor unique à axe horizontal transversal. C'est à bord de l'Alouette I que Jean Boulet battit, en juillet 1953, le record du monde de distance en circuit fermé : 1250 km, en un peu plus de 12 heures de vol.

Mais la grande innovation survint avec l'Alouette II, appareil de 5 places, mû par un turbomoteur Artouste II de Turboméca qui délivrait une puissance de 450 CV. Ce sont Charles Marchetti et René Mouille qui créèrent cet appareil, à l'origine des brillants succès des hélicoptères français équipés de turbomachines Turboméca. Jean Boulet effectua le premier décollage de l'Alouette II le 12 mars 1955. Les progrès furent très rapides : le 6 juin 1955, avec le deuxième prototype, Jean Boulet atteignit 8209 m, battant ainsi le record mondial d'altitude.

De son côté, la SNCASO (Société Nationale de Constructions Aéronautiques du Sud-Ouest) avait constitué, en 1945, un département hélicoptères, sous la direction de Paul Morain. Celui-ci avait déposé, en septembre 1944, un brevet d'hélicoptère dont le rotor était équipé de statoréacteurs en extrémité de pales. Le SO 1100 Ariel fut présenté, au sol, au salon aéronautique de novembre 1946. C'était, à la fois, un autogire et un hélicoptère : il pouvait décoller comme un hélicoptère grâce aux statoréacteurs alimentés en air comprimé à travers le moyeu du rotor, et il pouvait se déplacer horizontalement grâce à une hélice carénée. Un moteur Mathis G7, de 175 CV, fournissait l'énergie nécessaire pour entraîner l'hélice et le compresseur centrifuge qui alimentait le rotor en air comprimé. Cependant, les essais de décollage et de translation en effet de sol, effectués en 1948, montrèrent que la maniabilité en direction était insuffisante et que la consommation de carburant était excessive. Après d'importantes modifications, l'Ariel I effectua son premier vol le 7 mars 1949. Il était piloté par Claude Delys. Celui-ci était également aux commandes pour le premier vol du SO 1110 Ariel II, le 21 avril 1950, et du SO 1120 Ariel III, le 18 avril 1951. Cet Ariel III était le premier hélicoptère au monde à être mû par une turbomachine. Il s'agissait d'une Artouste de Turboméca, développant 260 CV, qui pouvait entraîner sans réducteur le compresseur. Comme son poids propre était la moitié de celui d'un moteur à pistons de même puissance, le poids total de l'ensemble était bien inférieur à celui de l'Ariel II. Cependant, l'Ariel III avait une consommation double de celle d'un hélicoptère à transmission mécanique. Le carburant injecté dans les chambres de combustion des statoréacteurs en extrémité de pales correspondait à une

Premiers hélicoptères

Premier vol du VS 300, piloté par Igor Sikorsky (1939)



SE 3101 avec un rotor principal et deux rotors de queue en V (1948)

Alouette II – Premier hélicoptère à turbomoteur (Avril 1955)



Photos : Historique de l'hélicoptère, J. BOULET

consommation voisine de celle de la turbomachine. Pour réduire cette consommation, la SNCASO revint à une solution consistant à fonctionner en autogire lors des vols en translation, avec, en outre, une aile fixe apportant les 2/3 de la sustentation. La maniabilité longitudinale et transversale restait assurée par le rotor. Cette solution fut matérialisée par le SO 1310 Farfadet, dont la motorisation était assurée par un turbocompresseur Arius I de 275 CV, et par une turbomachine Artouste II Turbomeca, de 275 CV également, qui entraînait, par l'intermédiaire d'un réducteur, une hélice Ratier. Le Farfadet fit son premier vol en avril 1953, avec Jean Dabos aux commandes. Celui-ci effectua la conversion, du vol stationnaire au vol de translation, en décembre 1953. Au cours de vols de croisière en altitude, une panne de brûleurs se produisit à bord du prototype d'Ariel II. Cependant, le vol en palier avait pu se poursuivre, sans combustion, avec l'air comprimé parvenant en extrémité de pale.

Aussi, la SNCASO entreprit-elle la réalisation du Djinn (SO 1220) dont les pales étaient mues par air comprimé. Celui-ci était fourni par un turbocompresseur Palouste de Turboméca. La puissance disponible dans le débit d'air comprimé était très importante (220 CV), pour une masse de 80 kg. Le SO 1220 à rotor bipale, entraîné par l'éjection de l'air en bout de pales, était très rustique. Le 11 décembre 1953, Jean Dabos, avec un rotor de 10 m de diamètre, porta le record mondial d'altitude, pour un hélicoptère pesant moins de 500 kg au décollage, à 4789 m. La version biplace SO 1221 fut fabriquée en série de 150 appareils.

1.8.4. Les hélicoptères de Sud-Aviation

En 1957, la SNCASE et la SNCASO fusionnèrent pour devenir Sud-Aviation. Toutes les activités hélicoptères furent progressivement regroupées à Marignane, la fabrication des pales restant à la Courneuve, près de Paris. L'activité de production fut assurée notamment par la fabrication en série du Djinn jusqu'en 1959 et de l'Alouette II (1305 exemplaires) jusqu'en 1975. Les performances de ces appareils et leur remarquable sécurité, due à la grande fiabilité des turbomachines Turbomeca Artouste II et Aztazou II, apportèrent à la division Hélicoptères de Sud-Aviation une renommée mondiale.

L'Alouette III, qui fit son premier vol en 1959, était équipé d'une turbomachine Artouste III de 880 CV. Cet excellent hélicoptère fut construit à près de 2000 exemplaires (dont 500 sous licence en Inde et en Roumanie).

Le Super Frelon (13 t, trois turbomachines) effectua son premier vol en 1962. Il fut utilisé pour la lutte anti-sous-marine. Une version civile pour transporter 34 passagers fut certifiée en 1967.

Le Puma fut réalisé pour l'Aviation Légère de l'Armée de Terre (ALAT). Conçu pour transporter

12 hommes avec leur armement et leur ravitaillement, il avait une vitesse de croisière de 250 km/h. Il devait aussi pouvoir voler en stationnaire, hors effet de sol, à l'altitude de 1500 m, en atmosphère tropicale. La masse maximale, initialement de 6,4 t, fut portée à 7,4 t en 1976 grâce à l'adoption de pales en composite verre-résine (fibres de verre dans une matrice en résine).

Le Super Puma vit sa masse maximale portée à 8,35 t en 1981.

La Gazelle fut conçue pour remplacer l'Alouette II, cinq places également, mais avec des performances accrues, un entretien simplifié, une sécurité améliorée. Ces perfectionnements furent obtenus par l'emploi :

- de pales en composite verre-résine, très résistantes aux chocs ;
- d'un moyeu sans articulation de traînée ;
- d'un fenestron (rotor de queue inclus dans la dérive) ;
- d'une turbomachine Astazou III de 600 CV au lieu des 500 CV de l'Astazou II.

En 1971, la Gazelle atteint des vitesses de plus de 300 km/h.

Le Lama associait légèreté et puissance : fuselage de l'Alouette II d'une part, moteurs et rotor de l'Alouette III d'autre part. Le 21 juin 1972, Jean Boulet atteignit l'altitude de 12442 m (il descendit ensuite en autorotation, car la turbomachine s'éteignit dès que le pilote réduisit la puissance). Le Lama avait démontré ses exceptionnelles qualités en très haute altitude, et répondait parfaitement à la demande : atterrir à 6000 m avec une charge utile de 200 kg.

Le Dauphin fut conçu pour être la version moderne de l'Alouette III. Il fut équipé d'une turbomachine Astazou XVI de 1050 CV. Une version bimoteur (2 x 650 CV) fut ensuite réalisée. La version 365 N, avec train rentrant et roue auxiliaire à l'avant, bénéficia également de l'amélioration de l'aérodynamique du fuselage et des entrées d'air. Cet appareil était capable de voler en croisière à 320 km/h.

L'Écureuil fut développé pour le créneau du marché civil des hélicoptères 6 places. Par rapport à la Gazelle à 5 places qui avait parfaitement réussi sur le marché militaire, il s'agissait de diminuer les coûts de fabrication et d'utilisation. Cet objectif de réduction des coûts fut considéré comme primordial, laissant un peu au second plan celui du maintien ou de l'accroissement des performances. Le coût de production fut réduit par l'instauration d'une chaîne d'assemblage, inspirée de celles de l'industrie automobile, avec installation d'ateliers de montage des sous-ensembles à proximité immédiate de la chaîne.

Par ailleurs, le personnel d'exécution était intéressé à son efficacité propre (principe « fini-parti ») et sa tâche était enrichie car la même équipe exécutait la totalité du montage de l'appareil, jusqu'au point fixe de sortie de chaîne.

En outre, le moyeu Starflex permet d'abaisser à la fois le coût de réalisation (réduction de 50 %), la masse (réduction de 40 %) et le coût d'entretien (réduction de 70 %) par rapport à un moyeu métallique tel que celui de l'Alouette. Le moyeu Starflex présente pleinement le caractère "fail-safe".

Le premier vol du prototype, équipé d'une turbomachine Lycoming, eut lieu en 1974.

L'Écureuil fut l'objet de plusieurs versions, avec des motorisations différentes de Lycoming ou de Turbomeca, qui furent produites en grande série.

1.8.5. Les récents progrès des hélicoptères

Le concept de l'hélicoptère à rotor principal unique et à rotor anticouple vit ses applications se développer très largement, grâce aux progrès continus en aérodynamique, à l'emploi des turbomoteurs et à des innovations concernant les structures et les matériaux.

C'est ainsi que l'aérodynamique du rotor fut grandement améliorée par les études de profils des pales en soufflerie. En France, depuis 1974, l'ONERA et l'Aérospatiale développèrent, en étroite collaboration, une nouvelle génération de profils OA (ONERA/Aérospatiale).

L'objectif était d'obtenir des profils de pales mieux adaptés au fonctionnement sur un rotor d'hélicoptère que le profil symétrique NACA 00012 ou 23012, utilisés couramment jusque vers 1970. Il s'agissait d'atteindre un coefficient de portance maximum C_{ZM} et un nombre de Mach de divergence de traînée M_d aussi élevés que possible. Un C_{ZM} élevé est nécessaire pour la pale reculante. Un M_d élevé permet à la pale avançante de ne pas avoir une traînée trop importante, d'où la possibilité d'utiliser une vitesse de rotation du rotor plus grande, ce qui retarde le décrochage de la pale reculante. En outre, réduire la traînée aérodynamique des pales diminue la puissance nécessaire en vol de translation en palier stabilisé (à 300 km/h, la traînée des pales absorbe souvent 40 % de la puissance totale). Les profils OA furent essayés sur des rotors tournants, dans les souffleries de l'ONERA (S2 Chalais-Meudon, S1 Modane et F1 Fauga). En 1980, deux rotors furent expérimentés en vol par l'Aérospatiale sur un Dauphin monoturbine et sur un Dauphin biturbine. Par rapport à un profil classique NACA 00012, les profils OA 209 et OA 212, jusqu'aux 3/4 de la pale, et le profil OA 207, en extrémité de pale, ont permis d'obtenir :

- en vol stationnaire, une masse au décollage supérieure de 2 % ;
- en vol de translation, un gain de vitesse à puissance égale et une réduction du niveau vibratoire.

Un résultat notable fut qu'il n'était pas nécessaire de choisir des profils de faible épaisseur pour obtenir une grande vitesse de vol. (Ce résultat rejoint celui obtenu pour les avions à ailes supercritiques).

Par ailleurs, l'amélioration des performances en vol stationnaire fut aussi acquise par un vrillage négatif, qui permit de reculer l'apparition du décrochage. Une valeur élevée du vrillage (jusqu'à - 14°) peut être obtenue par l'emploi de matériaux composites pour les pales (*cf. ci-dessous*).

La forme des extrémités de pales joue également un rôle important. C'est la traînée aérodynamique des extrémités de pale (au-delà de 80 % de l'envergure) qui consomme la majeure partie de la puissance fournie au rotor. Pour diminuer cette traînée, on réduit l'épaisseur relative (le profil OA 207 a 7 % d'épaisseur relative, au lieu de 12 % pour le profil OA 212) et on donne une flèche au bord d'attaque et au bord de fuite de l'extrémité d'aile. Les extrémités de pale en forme parabolique en flèche avec effilement et avec dièdre ont été essayées avec succès par Aérospatiale sur Super Puma II ou sur le Dauphin. Grâce à ces recherches sur les profils et sur les extrémités de pales, l'efficacité en vol stationnaire, caractérisée par le facteur de mérite FM (rapport de la puissance théorique optimale à la puissance réellement consommée) est passée de 0,65 en 1960 à 0,80 en 1980. En vol de croisière, la puissance consommée à la même vitesse d'avancement a été réduite de près de 20 %.

La réalisation des pales en matériaux composites a joué un rôle déterminant non seulement pour les performances aérodynamiques, mais aussi pour la durée de vie. Les pales métalliques (qui avaient succédé aux pales en bois des premiers hélicoptères) étaient très sensibles aux entailles, aux criques, et à la corrosion.

Au contraire, les matériaux composites verre-résine et carbone-résine présentent sur les matériaux métalliques des avantages tels que :

- une résistance à la fatigue plus élevée ;
- une quasi-insensibilité à la corrosion ;
- une très bonne résistance aux impacts.

Ces propriétés sont utiles pour toutes les applications, mais plus spécialement pour les pales de rotors d'hélicoptères. En outre, dans ce cas particulier, l'orientation des fibres et la technique de moulage peuvent être optimisées pour obtenir :

- une valeur élevée de la résistance mécanique aux forces centrifuges ;
- la variation progressive de l'épaisseur relative du profil selon l'envergure de la pale ;
- l'évolution du vrillage du profil selon l'envergure.

L'amélioration des pales a été accompagnée par un progrès considérable des moyeux des rotors.

Les moyeux métalliques avec articulations en battement, en pas et en traînée étaient des pièces mécaniques complexes, coûteuses et d'entretien délicat. Les matériaux composites ont permis une véritable innovation en

réduisant cette complexité mécanique. Le moyeu Starflex (Aérospatiale) a été le premier au monde à être réalisé en composite verre-résine. Le Starflex de l'Écureuil tripale et du Dauphin quadripale utilise des butées sphériques élastomère-métal, des adaptateurs de fréquence viscoélastiques, des bras souples verre-résine, flexibles en battement, et des paliers secs autolubrifiants. Le moyeu central, en forme d'étoile, est réalisé en composite verre-résine. Le Starflex permet de réduire la masse du moyeu de 40 %, le coût de fabrication étant divisé par 2,5.

Le moyeu Sphérflex (Aérospatiale) s'intègre au mât rotor en une pièce unique compacte qui réduit la traînée aérodynamique : un hélicoptère Dauphin, avec Sphérflex, voit sa traînée réduite de 30 % par rapport à celle d'un Dauphin avec Starflex. Le Dauphin grande vitesse a été équipé d'un Sphérflex. Cet appareil, muni d'un TM 333 Turbomeca et d'un rotor à 5 pales, a battu le record mondial de vitesse pour hélicoptère, en le portant à 200 noeuds, soit 360 km/h.

1.8.6. Comparaison des différents concepts d'hélicoptères (cf tableau 14)

La genèse et le développement de l'hélicoptère ont vu s'affronter de nombreux concepts. À l'origine, il s'agissait d'assurer une sustentation suffisante pour le décollage vertical et le vol stationnaire.

Les précurseurs, tels que Bréguet et Richet, conçurent des appareils à plusieurs rotors, de façon à éviter la réalisation de pales trop longues. L'aérodynamique et la motorisation étaient mal adaptées. Dans les années 30, le concept à deux rotors latéraux fut à l'origine de grands projets en Allemagne, grâce, notamment, au Professeur Focke. Le concept à deux rotors en tandem, dont Cornu avait brillamment montré les possibilités dès 1907, a été repris par Piasecki en 1945, avec, ensuite, la réalisation, par Piasecki et Vertol, de « bananes volantes ». D'autres concepts furent développés jusqu'au stade des réalisations expérimentales. L'emploi de la réaction en extrémité de pales était très séduisant, mais la combustion exigeait une trop importante consommation de carburant. Seul le Djinn, qui utilisait l'air comprimé sans combustion, parvint au stade de la série. Finalement, c'est le concept rotor principal et rotor anti-couple qui s'est imposé, grâce, notamment, à Igor Sikorsky. Les progrès de la mécanique ont permis de surmonter les difficultés liées au rotor anti-couple. L'emploi des turbomoteurs, les progrès de l'aérodynamique des profils et des extrémités de pales ont conduit à des performances et à des qualités de vol très satisfaisantes, ainsi qu'à une fiabilité et un coût global permettant une utilisation opérationnelle pour des missions variées. Les recherches, études et essais en cours engendreront de nouveaux progrès pour ce concept à haut potentiel.

	Masse à vide équipée (t)	Puissance au sol/masse à vide (kW/kg)	Vitesse (km/h)	Moteur	Observations
1ère génération Djinn (1952)	0,36	0,49	125		éjection d'air comprimé en bout de pales-pas de rotor anti-couples
2ème génération Alouette 2 (1957) Alouette 3 (1961)	0,9 1,1	0,44 0,58	200 200	Artouste Turbomeca puis Astazou Turbomeca	
3ème génération Super-Frelon (1966) Puma (1969) Gazelle (1971) Lama (1971)	7,3 4 0,9 1,1	0,5 0,5 0,5 0,64	250 250 à 270 260 120	3 Astazou 2 Astazou Astazou	Radar lutte ASM Rotor rigide-anticouple fenestron
4ème génération Dauphin (1975) Écureuil (1978) Super Puma (1981)	1,6 1,1 4,5		280 230 à 250 260	1 - 2 Arriel 1 - 2 Arriel 2 Malika	fenestron moyeu rotor starflex

Tableau 13. Les générations d'hélicoptères français (ou en coopération)

Les hélicoptères de 5^e génération sont :

- Le Tigre (en coopération avec l'Allemagne) en deux versions :
 - appui-protection (canon, roquettes, missiles air-air) ;
 - antichar (missiles antichar, missiles air-air, combat de nuit) ;

- Le NH 90 (en coopération avec l'Allemagne, l'Italie et les Pays-Bas) pour le transport tactique.

Nota : le taux de motorisation (rapport puissance/masse) élevé est un des points forts des hélicoptères de l'Aérospatiale qui sont équipés de turbomoteurs Turbomeca - cf. records mondiaux d'altitude Alouette II (1955), Alouette III (1960), Lama (1972).

Historique des différents concepts d'hélicoptères. Dates des premiers essais au sol ou en vol. Avantages et inconvénients des divers concepts.

Concept	Exemples	Avantages	Inconvénients
Deux rotors coaxiaux	Léger 1905 Ellehammer 1912 Rieseler 1934 Bréguet-Dorand 1935 Hiller 1946 Yakovlev 1947 Bréguet 1948 Karnov 1948		Complexité de la mécanique de commande des rotors. Faible manœuvrabilité en lacet (en vol stationnaire).
Deux rotors en tandem	Cornu 1907 Piasecki 1945 Bell 1952 Bristol 1953	Bien adapté au transport de charges lourdes et encombrantes.	Longue ligne de transmission à forte puissance.
Deux rotors latéraux	Renard 1904 Focke 1936 Weir 1938 Zagi-Omega 1943 SNCASE 1948		Trainée aérodynamique importante. Difficulté de pilotage et de mise en autorotation, en cas de panne d'un rotor. Instabilité en roulis, en vol stationnaire, près du sol.
Deux rotors engrenants	Flettner 1939 Kellett 1944 Kaman 1947 SNCAC 1947		Trainée aérodynamique importante. Mal adapté pour les vitesses de translation élevées.
Un rotor principal et un rotor anticouple	Sikorsky 1939 Bell 1943 SNCASE 1951 et la majorité des appareils modernes	Bien adapté à la plupart des missions. Potentiel d'amélioration élevé.	Servitudes et problèmes de sécurité liés au rotor anticouple
Un rotor principal et deux rotors de queue en V	SNCASE 1950		Interaction du souffle du rotor principal sur les deux rotors de queue
Un rotor à réaction	Focke-Doblhoff 1943 SNCASO Ariel 1947 SNCASO Djinn 1953	Simplicité mécanique	Forte consommation de carburant. Bruit et signature infra-rouge élevés (en cas de stato en bout de pale). Faible manœuvrabilité en lacet (en vol stationnaire).

TABLEAU 14. – Nota : Léger et Renard sont cités en raison de leur antériorité, mais leurs réalisations étaient au stade de la maquette. Les formules à multiples rotors principaux, telles que celle du Bréguet-Richet 1907, ne figurent pas dans ce tableau.

Hélicoptères militaires Aerospatiale et Eurocopter

AS 532 U2 Cougar
(bimoteur de transport tactique)



HAP-HAC
(hélicoptère de combat)

AS 565 MB Panther
de la Marine Nationale
(recherche et sauvetage en mer)



Photos : Eurocopter

Hélicoptères civils Aerospatiale et Eurocopter

EC 120
(monomoteur léger multimission)



EC 135 EMS
(bimoteur léger multimission)

AS 365 N3 Dauphin
(bimoteur transport, recherche et sauvetage)



Photos : Eurocopter