

LE STATORÉACTEUR



Une révolution éphémère

par
François Andriussi



1

Plan suivi

- 1) **LES PRÉCURSEURS**
René Lorin René Leduc
- 2) **C'EST QUOI, UN STATO-RÉACTEUR?**
- 3) **LES AVIONS LEDUC**
- 4) **ASSOCIATION TURBO/STATO**
- 5) **ENGINS SPÉCIAUX**

2

1) LES PRÉCURSEURS René Lorin René Leduc

- 2) C'EST QUOI, UN STATO-RÉACTEUR?
- 3) LES AVIONS LEDUC
- 4) ASSOCIATION TURBO/STATO
- 5) ENGIN SPÉCIAUX

3

René Leduc

René Leduc est un personnage atypique .

Il est né le 24 avril 1898
à Saint-Germain-lès-Corbeil.

Il quitte l'école à 14 ans pour se
perfectionner dans la menuiserie de qualité.

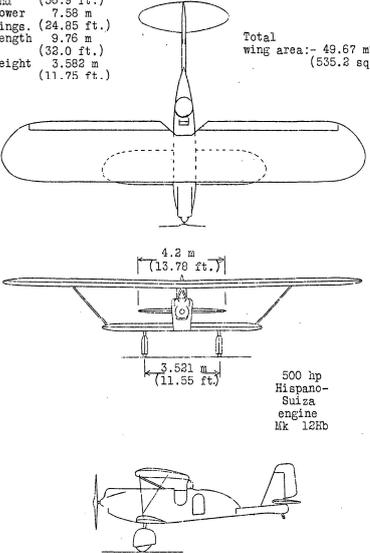
En 1914, on le trouve dans les ateliers de Louis Breguet.

À cette époque, les cellules des avions étaient faites de bois, de
toile et de cordes à piano.



4

Span:-
Upper 17.012 m
and (56.9 ft.)
Lower 7.58 m
wings (24.65 ft.)
Length 9.78 m
(32.0 ft.)
Height 3.582 m
(11.75 ft.)



Total
wing area:- 49.67 m²
(535.2 sq.ft.)

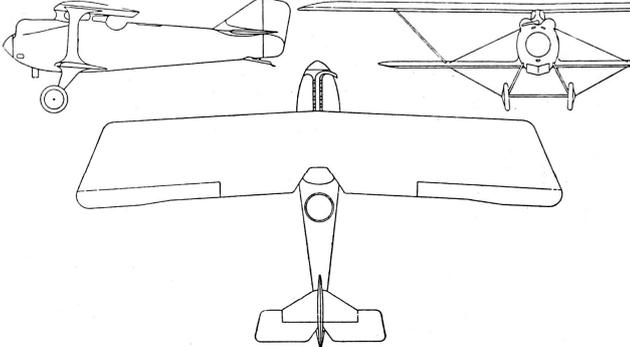
4.2 m
(13.78 ft.)

3.521 m
(11.55 ft.)

500 hp
Hispano-
Suiza
engine
Mk 12Rb

Après la guerre, il passe par Supélec et s'intéresse particulièrement à la thermodynamique.

Il retourne chez Louis Breguet, mais au bureau des calculs.



En 1926, René Leduc crée le **Breguet 27**, avec sa surprenante silhouette due à la poutre qui tient lieu de structure.

C'est l'époque du **Breguet 19**, le célèbre *Point d'Interrogation*.



5

En 1933, il fait une demande de brevet d'invention pour ce qu'il appelle une **TUYÈRE THERMO-PROPULSIVE**.

Le bureau international des brevets situé à La Haye signifie le rejet de la demande pour cause *d'antériorité*.

Le dossier de retour contient une copie d'un brevet déposé en 1908 par un inventeur français, **René Lorin** domicilié à Paris.

René Leduc recherche cet inventeur quasiment inconnu mais qui connaissait parfaitement le sujet traité.

Lorin étant décédé le 16 janvier 1933, **Leduc** rencontrera sa veuve qui lui communiquera les dossiers de son époux.

6

René Lorin

né le 24 mars 1877 à Paris est un ingénieur français, diplômé de l'*École Centrale des Arts et Manufactures* en 1901.

Sa carrière professionnelle se déroula à la **Compagnie Générale des Omnibus**, ancêtre de la **RATP**.

En dehors de son activité habituelle, il se passionna pour la thermodynamique,

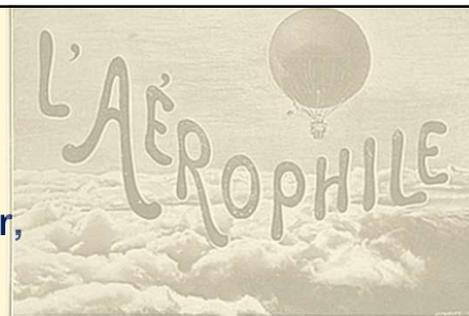


7

Après avoir présenté dans la revue *L'Aérophile* dès 1907, le principe d'un propulseur, qu'on appellera plus tard **statoréacteur**, il en déposa le brevet en 1908.

En 1913, il publia dans la même revue une suite d'articles décrivant les grandes lignes de son invention.

Certains prétendent qu'il lui est alors proposé de faire un exposé devant les membres de l'**Académie des Sciences**.



REVUE MENSUELLE ILLUSTRÉE
DE
L'AÉRONAUTIQUE
et des sciences qui s'y rattachent

Directeur-Fondateur : GEORGES BESANÇON

Deuxième Année — 1904

Aux Bureaux de l'AÉROPHILE
84, Rue du Faubourg Saint-Honoré, 84
PARIS (8^e)
1904

8



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Les académiciens furent probablement intéressés par la conclusion de l'équation définissant la force de propulsion qui est proportionnelle à la masse spécifique de l'air " ρ " et au carré de sa vitesse.

Cette formule rappelait les travaux récents effectués par les constructeurs de grandes structures métalliques .

9

Gustave Eiffel avait fait construire une soufflerie à Auteuil pour étudier les effets du vent sur les structures de ses ponts et viaducs particulièrement exposés dans les vallées.

Les études réalisées ont établi la formule de ces forces passives qui reste inchangée plus d'un siècle après.

Ces forces induites ont été adoptées pour définir la traînée aérodynamique des avions.

$$T = C_x \times 1/2 \rho V^2 \times S$$

Avec : **T** : valeur de la traînée en N (Newtons)
C_x: coefficient de traînée -sans échelle-
 ρ : masse volumique du fluide en kg/m³
V : vitesse relative en m/s
S : maître-couple en m²

10

**Lorin annonça qu'on pourrait
ainsi créer des
avions à traînée nulle !**

**Mais il poussa trop loin son
enthousiasme en annonçant
qu'on construirait alors des
avions qui voleraient à 1.000
km/heure.**



**Sa prophétie aurait, dit-on, déclenché un éclat de rire général,
très mal ressenti par l'orateur qui fut oublié pendant 25 ans.
On rappellera que c'est le 25 juillet 1909 que Louis Blériot
effectua la première traversée de la Manche en avion.**

**Son fragile *Blériot XI* était tracté à 100 km/h par le minuscule
moteur Anzani, un 3 cylindres de 25 ch.**

11

1) LES PRÉCURSEURS
René Lorin René Leduc

2) C'EST QUOI, UN STATO-RÉACTEUR?
RAMJET en langage international
STATO en langage courant

3) LES AVIONS LEDUC

4) ASSOCIATION TURBO/STATO

5) ENGINES SPÉCIAUX

12

Le corps d'un statoréacteur comprend une entrée suivie d'un conduit divergent où l'air ralentit et se comprime en transformant son énergie cinétique en énergie de pression, suivant sensiblement la formule de Bernoulli simplifiée qui rappelle la loi de conservation, de l'énergie :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$



Représentation très symbolique

injection de kérosène

13

Ce conduit débouche sur une chambre de combustion à pression constante où brûle le combustible grâce à des accroche-flammes.

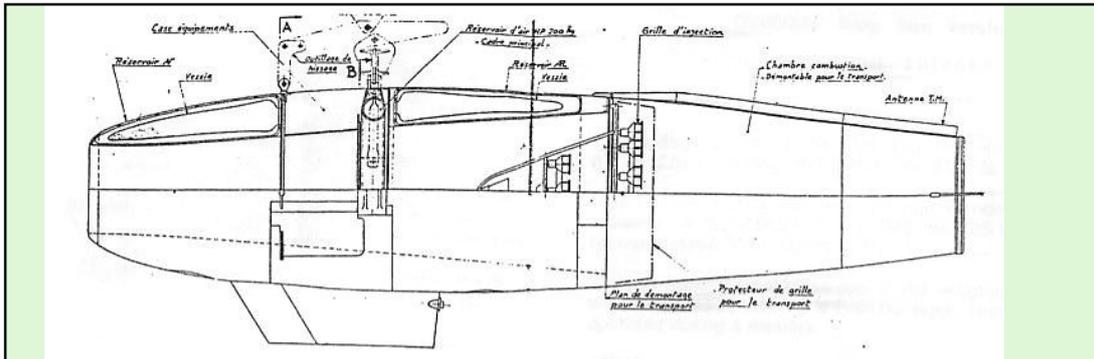
C'est la conception et la définition de ces accroche-flammes qui constituent la principale recherche dévolue à l'ingénieur concepteur.

Pour favoriser le rendement du système, ces éléments ne doivent occasionner que de faibles pertes de charge,

L'air échauffé et les gaz de combustion associés se dilatent et s'évacuent dans l'atmosphère par une tuyère.

L'augmentation de la quantité de mouvement du flux traversant engendre une impulsion utilisable.

14



Ci-dessus, une coupe partielle de l'engin SE.4500 réalisé par Sud-Aviation en 1954 pour emmener une bombe A.

Le projet fut abandonné lors du choix du Mirage IV comme vecteur.



15

Lorin avait démontré que l'impulsion était proportionnelle à la masse spécifique de l'air " ρ " et au carré de sa vitesse.

On en déduit qu'un statoréacteur, *totale*ment inefficace à vitesse nulle, est incapable de démarrer sans l'action d'un accessoire de lancement ou d'un avion porteur.

Il ne sera intéressant qu'aux grandes vitesses, d'où la recherche des effets au delà de la vitesse du son..

Ernst Mach, né le 18 février 1838, est un physicien autrichien.
En son honneur, on a convenu d'appeler **Mach** le rapport entre la vitesse du mobile par rapport à la vitesse du son dans son milieu de déplacement.



16

Les physiciens ont démontré que la célérité du son (C_s) dans l'atmosphère était directement proportionnelle à la racine carrée de la température exprimée *degrés Kelvin*.

On peut l'estimer à : $C_s = 20,1 \cdot \sqrt{T}$

soit, à $27^\circ\text{C} / 300^\circ\text{K}$, $C_s = 348 \text{ m/s}$ et : $V_s = 1253 \text{ km/h}$

Au delà de Mach.1, il se forme une onde de choc plane à l'entrée du moteur où l'air passe instantanément à une vitesse subsonique, se comprime en conséquence, puis continue le processus normal.

La poussée est alors fortement augmentée.

17

Au delà de Mach.2, le rendement de cette onde de choc se dégrade rapidement, ce qui limite son domaine d'utilisation.

C'est probablement la raison qui a fait limiter la vitesse du Concorde à Mach. 2,02 et celle du Rafale à Mach. 1,80.

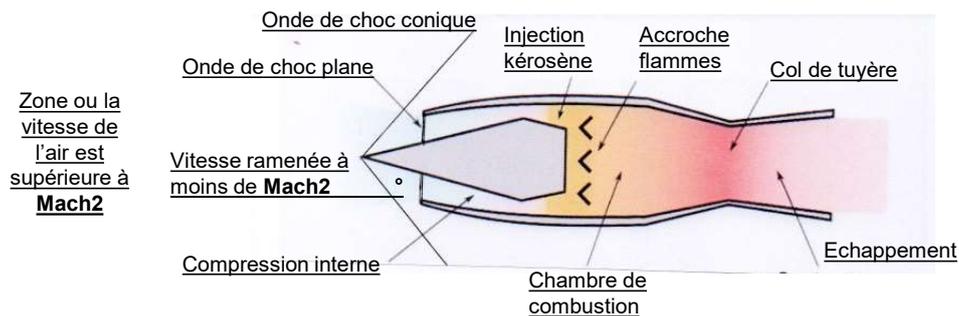
Pour fonctionner au-delà de Mach.2, on a modifié la prise d'air pour provoquer des **compressions externes** en **régime supersonique**.

18

L'entrée devient *annulaire* autour d'un *noyau central fuselé* avec une *pointe conique* où se forme une onde de *choc conique*.

Derrière cette onde de choc conique, la vitesse *reste supersonique*, mais à un *moindre niveau*, avec une *compression correspondant au ralentissement*.

représentation très schématique



19

La diminution de vitesse se fait en deux temps :

- 1 - d'un Mach **élevé**, à un Mach **moins élevé**, en traversant la première onde de **choc conique**.
- 2 - puis de ce Mach **réduit** à un Mach **inférieur à 1** à travers la deuxième onde de **choc plane**.

La forme de l'onde de choc conique dépend de l'angle de la pointe du noyau et de la vitesse de l'air. Sa position pourra être ajustable, et sera définie pour assurer le meilleur rendement.

Pour les très grandes vitesses, on peut adopter des cônes successifs avec des ralentissements progressifs.

20

SE 4400 sur le pas de tir**Exemple :**

Lors de la définition des éléments principaux de l'engin sol/air SE 4400 qui devait atteindre la vitesse maximale de Mach 4 on a choisi une entrée d'air avec une pointe d'entrée créant une onde de choc conique adaptée au projet.

Le 18 avril 1958, en établissant le nouveau record du monde de vitesse des appareils aérobies, l'air passait :

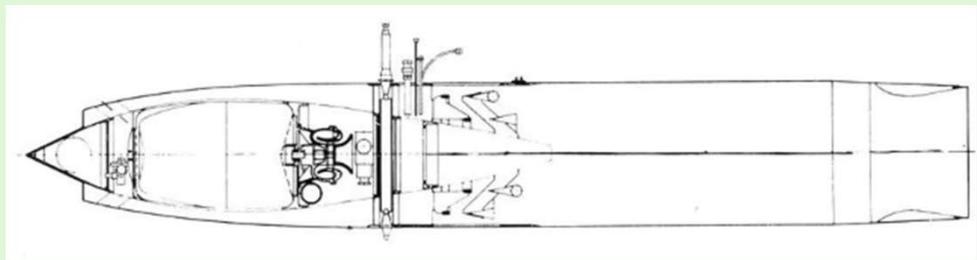
de Mach 3,7 à Mach 1,8

puis de Mach 1,8 à Mach 0,9.

Booster

21

Principe de l'engin SE 440



22

Les recherches d'applications de statoréacteurs

Certains scientifiques, lecteurs de la revue L'Aérophile qui publiait les communications de René Lorin, ont étudié cette technologie dès le début du XXe siècle.

Les dossiers communiqués à Leduc par la veuve de Lorin, rapportaient la visite d'un *général d'aviation italien* venu à Paris pour le rencontrer.

En 1927, les Américains ont réalisé des expérimentations pour le NACA à Langley, en Virginie.



23

En 1929, en URSS B. S. Stetchkine découvre le principe du statoréacteur et s'y intéresse.

Le Russe Mikhaïl Makarovitch Bondariouk s'engage alors dans cette voie et adapte l'avion de chasse Lavochkin La-7S, assisté par deux statoréacteurs Bondariouk PVRD-430 installés sous les ailes.

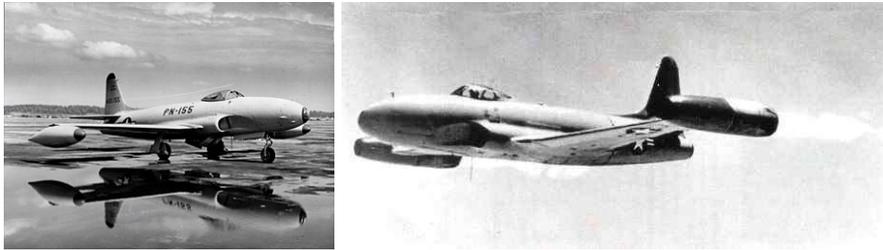


24

De 1930 à 1942, l'ingénieur autrichien Eugen Sänger mit sur pied un programme de recherches pour étudier le fonctionnement des statoréacteurs.



Aux USA, en 1947, des statoréacteurs Marquardt C-30 sont montés en bout d'ailes sur le chasseur à réaction Lockheed P-80 A Shooting Star.



25

- 1) LES PRÉCURSEURS
René Lorin René Leduc
- 2) C'EST QUOI, UN STATO-RÉACTEUR?
- 3) LES AVIONS LEDUC**
- 4) ASSOCIATION TURBO/STATO
- 5) ENGINES SPÉCIAUX

26

René Leduc obtint en 1937, par le ministère de l'Air Pierre Cot une commande d'études pour la réalisation d'un avion propulsé par un statoréacteur.

L'obligation de faire appel à un lanceur de mise en vitesse conduit à envisager, soit un chariot pousseur, soit une rampe avec des boosters à poudre largables, ou bien un avion porteur.

C'est la solution avec avion porteur que Leduc a toujours employée, même dans les versions avec assistance de turboréacteurs :

Turboméca, incapables d'assurer le décollage

SNECMA Atar, une option qui fut peu testée.

27

Ces travaux, arrêtés pendant la période 1940-1945, ont repris à la Libération où trois avions SE 161 Languedoc furent mis à sa disposition ainsi qu'exceptionnellement, deux Heinkel He 274 effectuant un seul vol chacun.

Languedoc



Heinkel



28

Au total, 6 appareils de quatre types se succédèrent, de puissances et de performances croissantes.

- 2 - *Leduc 010-1* et *Leduc 010-2*
- 1 - *Leduc 016*, (transformé en *010-3*)
- 2 - *Leduc 021-1* et *Leduc 021-2*
- 1 - *Leduc 022* (plus 1 arrêté à 80 %)

Les essais en vol, qui couvrent la période allant de novembre 1946 à décembre 1957, ont lieu à Toulouse, à Brétigny, puis à Istres.

Les pilotes d'essai étaient Jean Gonord, Yvan Littolff, Jean Sarraill et Bernard Witt pour le CEV.

29

Leduc 010

Le *Leduc 010-01* est le premier modèle fabriqué à Toulouse le 23 septembre 1946.

Il effectue ses essais en vol du 19 novembre 1946 au 25 juillet 1952.



30

C'est un appareil de formule classique à aile médiane droite de faible surface.

On remarque surtout que le pilote n'a aucune vue directe sur l'espace extérieur et doit utiliser des dispositifs périscopiques, ce qui est loin de faciliter les manœuvres d'approche et d'atterrissage.

Le premier vol au monde d'un appareil propulsé par statoréacteur est réalisé à Toulouse-Blagnac le 21 avril 1949, par le 010-01 piloté par Jean Gonord qui effectue ensuite son convoi sur un Languedoc à Brétigny le 8 juillet.

Le 010-01, est ensuite amené par un autre convoi de Brétigny à Istres le 18 décembre 1950.

31

Le 21 avril 1949 le 010-02 sort de l'usine d'Argenteuil.

Il effectue ses essais en vol à partir du 14 mars 1950.

Le 21 juin 1951 Jean Sarail fait son premier vol sur le Leduc 010-02 avec allumage du stato.

Le 27 novembre 1951, l'arbre de la pompe d'injection de kérosène se casse, le stato du 010-02 s'éteint et l'appareil continue en plané.

L'avion se crashe à 6 km du terrain, l'appareil est détruit et Jean Sarail est grièvement blessé (fractures des vertèbres dorsales)

32

Lors des essais du 25 juillet 1952, au largage, l'ouverture d'une des pinces avant cafouille et le *010-01* part en vrille.

Au passage, il arrache le volet gauche du Languedoc que le pilote André Laurent récupère in-extremis.

Aux commandes de l'appareil, Yvan Littolf rattrape la vrille, continue en plané, mais faute de repères il a beaucoup de mal à joindre le terrain.

Le Leduc *010-01* est détruit par crash, son pilote est très grièvement blessé.

Ce fut le dernier vol des avions Leduc 010

33

Leduc 016

La particularité du Leduc *016* consistait à l'ajout de 2 turboréacteurs *Turboméca Marboré* en bout d'ailes.

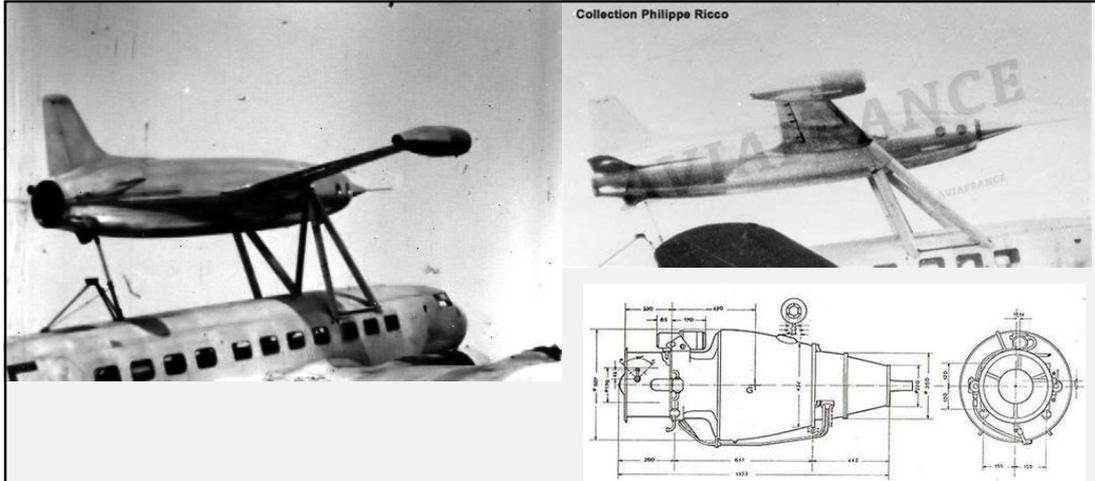
Le 2 mai 1951, Yvan Littolf effectue à Istres le premier vol en plané du *016*, puis le même jour, un vol avec allumage du statoréacteur seul.

Le 15 janvier 1952, Jean Gonord fait un vol du *016* avec allumage de la tuyère et des réacteurs d'appoint.

Atterrissage violent : le train endommagé sera réparé.

Suite à de nombreux incidents, Jean Gonord met fin à sa carrière de pilote d'essai.

34



Collection Philippe Rieco

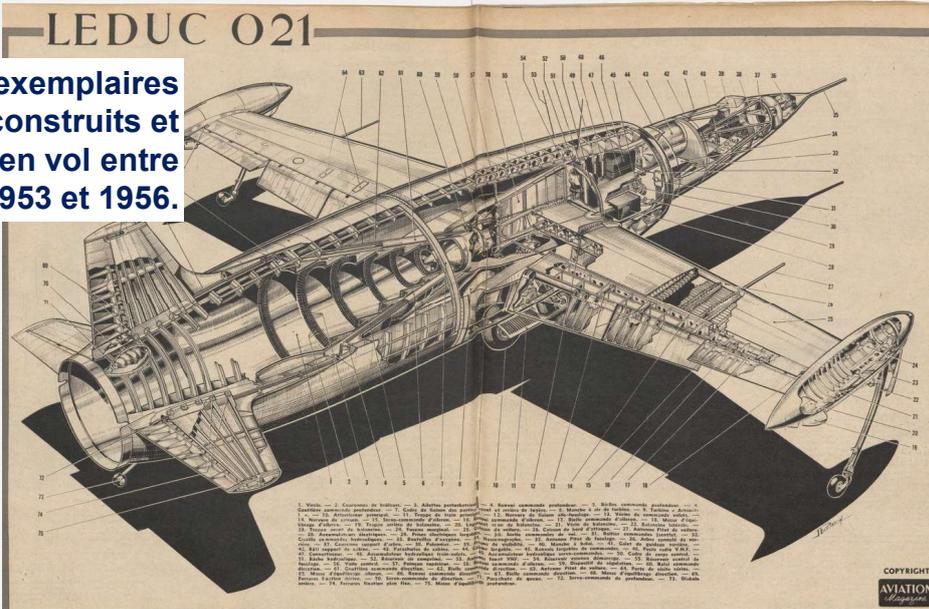
Devant leur inefficacité, les deux Marboré seront remplacés par des réservoirs de carburant annexes, puis l'appareil fut transformé en 010-3.

35

Leduc 021

Le Leduc 021 était conçu pour atteindre la vitesse du son, Mach 1, et avoir une vitesse ascensionnelle très élevée.

Deux exemplaires ont été construits et essayés en vol entre 1953 et 1956.



COPYRIGHT AVIATION

36

Leduc 021

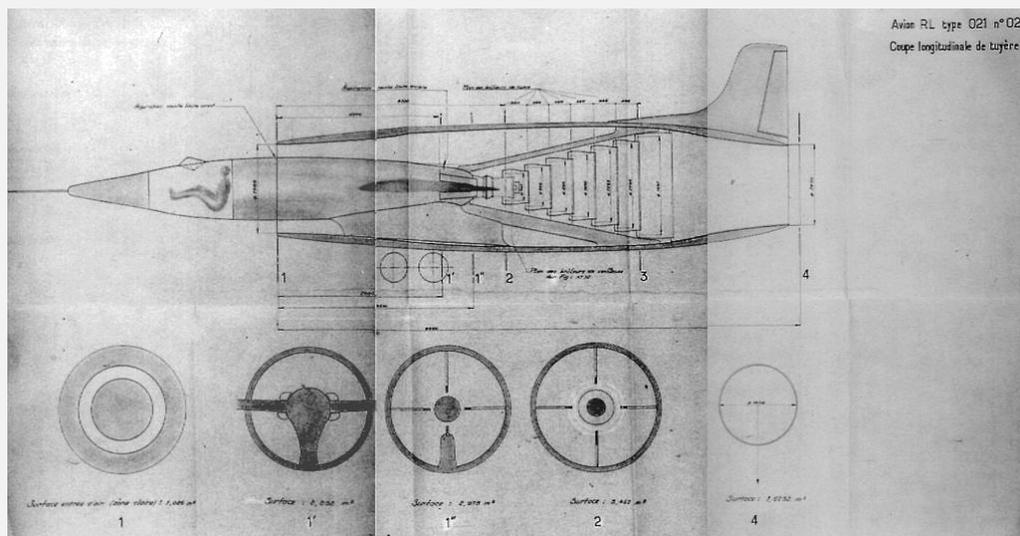
Le 021-01 sort de l'usine d'Argenteuil le 16 mars 1953

Le 021-02 sort le 12 février 1954.



37

Le Leduc 021 bénéficiait d'une version améliorée du statoréacteur du Leduc 010.



Le 7 août 1953, avec Yvan Littolff aux commandes, le premier largage eut lieu pour un vol plané et le même jour, un autre essai où le statoréacteur fut allumé.

38

**Le 18 juin 1955,
Jean Sarail assure un largage avec allumage du stato.**

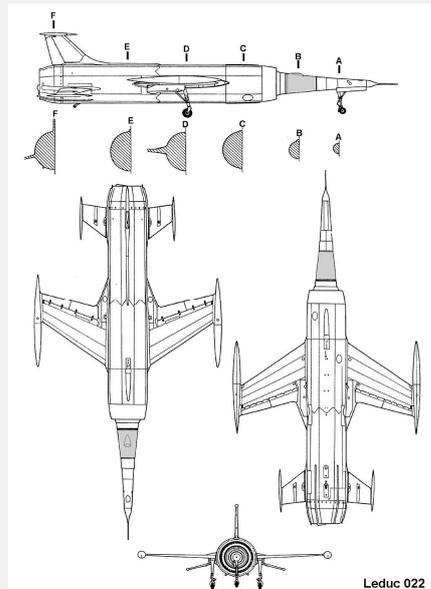
**Mais les essais en vol montrèrent que les 021 n'atteignaient
que Mach 0,8 et que leur vitesse ascensionnelle était très
inférieure à celle exigée.**

**Le 4 décembre 1956 Yvan Littolff effectue le dernier vol du
021-2.**

**Les Leduc 021 furent arrêtés après avoir effectué au total
214 vols dont 125 avec largage.**

39

Leduc 022



40

Le Leduc 022 était autonome car il était équipé, au centre de sa tuyère, d'un turboréacteur Atar 101 D3 de 2 800 kgp de poussée qui devait lui permettre de décoller.

Sa vitesse maximale espérée était Mach 2.

Le 022-01 sort de l'usine d'Argenteuil le 5 juin 1956.

C'est Jean Sarrail qui le pilote pour la première fois à Istres le 26 décembre 1956, en n'allumant que le *turboréacteur*.

Yvan Littolff allume le statoréacteur, le 1er juin 1957, lors du 34e vol.

41

Les essais, qui ont lieu jusqu'en décembre 1957, mettent en évidence de grandes difficultés de régulation de la combustion en régime partiel.

L'avion n'a jamais pu franchir le mur du son, même en piqué à cause de la trop grande traînée induite par son fuselage cylindrique, non optimisé selon la loi des aires.

Le Leduc 022 effectue son dernier vol le 21 décembre 1957, entre les mains d'Yvan Littolff.

Deux jours plus tard, Jean Sarrail fait un roulage au sol et la tuyère prend feu, mais le pilote s'en sort indemne.

L'appareil ne sera pas réparé avant la fin du contrat et l'arrêt de la société Leduc en février 1968.

42

À la fin de la IV^{ème} république, de graves déficits budgétaires, et les contraintes qui en découlèrent, obligèrent l'État Français à supprimer un grand nombre de dépenses.

En février 1958, devant les difficultés techniques rencontrées dans le développement des appareils Leduc et l'absence de résultats, le gouvernement prit la décision d'arrêter définitivement les travaux sur ces avions.

La société Leduc ne disposant que de contrats de l'État, est dissoute et remplacée par la société HYDRO LEDUC.

Spécialisée dans la conception et la fabrication de composants hydrauliques sur mesure et de très grande qualité, elle existe encore de nos jours.

43

Explications sur ces multiples échecs.

Pendant la décennie de l'aventure des avions Leduc, les observateurs du monde aéronautique ont diversement commenté ces échecs successifs et recherché les causes probables.

Le plus souvent, on reprochait au maître d'œuvres une trop grande dispersion dans ses réalisations, au détriment du principe de base, sa *Tuyère Thermo-Propulsive* originale.

Pourquoi consacrer un temps précieux à concevoir un médiocre train d'atterrissage que MESSIER aurait exécuté à meilleur compte?

La mise au point de voilures usinées dans la masse ne pouvait compenser le mauvais dessin aérodynamique des cellules.

C'est la fin de l'aventure Leduc.

44

- 1) LES PRÉCURSEURS
René Lorin René Leduc
- 2) C'EST QUOI, UN STATO-RÉACTEUR?
- 3) LES AVIONS LEDUC
- 4) ASSOCIATION TURBO/STATO**
- 5) ENGIN SPÉCIAUX

45

Il était logique de surmonter le handicap du statoréacteur en le combinant avec un turboréacteur qui assurerait le décollage et l'atterrissage.

En France, on a travaillé sur l'appareil *Matra R-130* qui associait un turboréacteur Rolls-Royce "Nène" et un statoréacteur Matra concentriques.



46

Le Nord 1401 Gerfaut

Appareil assez méconnu,
Le Nord 1401 Gerfaut a été conçu par Jean Galtier.



47

Le Gerfaut a eu trois versions construites à un unique exemplaire chacun utilisant un dérivé différent du turboréacteur Snecma ATAR 101 par une entrée d'air frontale.

Il se présente comme un monoplace à aile delta ayant une flèche de plus de 58° , de construction entièrement métallique.

Il a un petit empennage horizontal sur la dérive.

Piloté par André Turcat, le *Nord 1401 Gerfaut* fut le premier avion européen à atteindre Mach 1 en léger piqué.

Modifié en *Nord 1402-B Gerfaut 1B*, toujours avec André Turcat, il devint le premier avion européen à passer le mur du son en palier.

48

Le Nord 1500 Griffon



Nord 1500 Griffon I

Le Nord 1500 Griffon faisait appel à la propulsion mixte par turboréacteur et statoréacteur à la manière du *Gerfaut* qui l'avait précédé.

Ce projet était prévu pour aboutir à un chasseur capable de Mach 2 à l'horizon 1960.

Le statoréacteur fournissait le supplément de poussée nécessaire aux grandes vitesses que la faiblesse des turboréacteurs français de l'époque ne permettait pas d'atteindre.

49

Contrairement à son rival le *Leduc 022*, le *Griffon* bénéficiait d'une étude aérodynamique aboutie, avec une voilure delta à empennage « canard » et un fuselage optimisé selon la loi des aires.

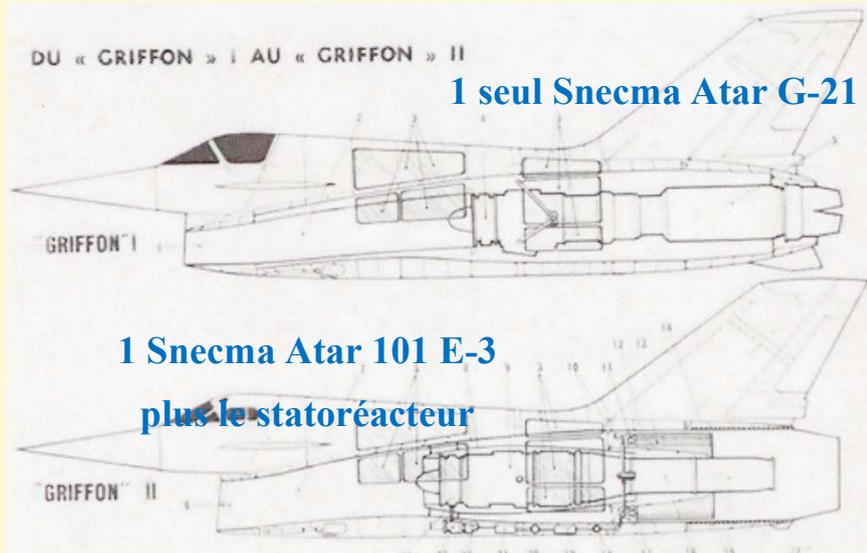
Le Nord 1500-01 Griffon fit son premier vol à Istres le 23 janvier 1957, par le chef pilote d'essais, Michel Chalard.

Le second exemplaire *Nord-1500-02 Griffon II* démontra de manière spectaculaire le bien-fondé de sa conception en enlevant le record du monde de vitesse sur 100 kilomètres en circuit fermé le 25 février 1959, aux mains d'André Turcat.

André Turcat et Armand Jacquet, moins connu, se succèdent aux commandes du prototype^{esl}.

50

Les Nord 1500 Griffon I et Griffon II



En octobre 1959, toujours piloté par André Turcat, le Nord-1500-02 Griffon II atteint une vitesse maximale de Mach 2,19.

51

Mais les formidables performances du *Griffon II* ne débouchèrent pas sur une utilisation opérationnelle.

Le statoréacteur, fonctionnait parfaitement en « tout ou rien », mais présentait de grandes difficultés de contrôle qui ne permettait pas une exploitation convenable en régime intermédiaire.

On peut penser que ces difficultés ont été les principales raisons des multiples échecs des avions Leduc.

Dans les années 1950-1960, ce défaut pratiquement insurmontable a été occulté dans les utilisations sur missiles subsoniques ou supersoniques.

Les engins SE 4200, SE 4500 et SE 4400, étudiés et réalisés à Cannes ont parfaitement fonctionné et battu des records.

52

ABOUTISSEMENT DE L'ASSOCIATION TURBO/STATO

LA POST-COMBUSTION

Malgré tous les progrès apportés aux matériaux disponibles, on doit éviter un échauffement exagéré des éléments fixes ou mobiles de la partie chaude des turboréacteurs.

On est donc contraint de limiter la richesse de la combustion par rapport au rapport stœchiométrique du combustible.

Il en résulte que les gaz d'échappement contiennent encore de l'oxygène disponible utilisable dans une chambre de combustion disposée à la suite.

53

La *post-combustion* consiste à installer des rampes d'injecteurs dans une chambre de combustion disposée à la suite de la sortie d'échappement.

Cet élément est devenu un complément qui permet, sur les avions militaires, une sensible augmentation de la poussée permettant des décollages sur des pistes plus courtes, et qui offre des échappatoires salvatrices.

Bien que la mise en route de la post-combustion ne pénalise aucunement l'ensemble des éléments du turboréacteur, l'énorme augmentation de la consommation impose une durée d'usage limitée.

Sur quelques avions civils, comme le Concorde, son utilisation est strictement limitée au début du décollage afin de limiter la longueur de piste nécessaire.

54

- 1) LES PRÉCURSEURS
René Lorin René Leduc
- 2) C'EST QUOI, UN STATO-RÉACTEUR?
- 3) LES AVIONS LEDUC
- 4) ASSOCIATION TURBO/STATO

5) ENGIN SPÉCIAUX

55

Missiles hypersoniques dont les vitesses doivent être supérieures à Mach.5

On en trouve trois types spécifiques :

- ❑ Les missiles mis en altitude moyenne par avions porteurs ou entraînés par des engins balistiques.
Le **Kinjal** est un missile hypersonique mono-étage qui reprend sans doute l'étage propulsif du **SS-26 Iskander-M**, russe dont l'agence **TASS** parle depuis 2019, avec une portée minimum de 50 km jusqu'à une portée maximum de 280 km. Ils utilisent des moteurs à combustible solide, ce sont donc des fusées.
- ❑ Les **planeurs hypersoniques**,
qui sont amenés à très haute altitude, de 100 à 120 km, par des engins balistiques et qui descendent dans l'atmosphère en atteignant des vitesses de l'ordre de Mach.9 à 10. Leur motricité est fournie par la pesanteur.
- ❑ Les **superstatoréacteurs «scramjet»**
sont encore en cours d'expérimentation.
On a très peu de renseignements, le plus crédible date de 2009 par Hyshot en Australie. Alimentés exclusivement avec de l'hydrogène, on parle de quelques secondes d'allumage avec une vitesse maxi de Mach.8.

56

Autres programmes de recherche actuels sur le superstato

Kholod en Russie

un premier superstatoréacteur aurait volé à Mach. 5,75 le 26 novembre 1991

Aux États-Unis, le Scramjet, X-51

a permis de maintenir une vitesse de Mach 6 pendant au moins 300 secondes 1^{er} mai 2013.

En France, l'ONERA travaille sur le projet **LEA** d'un stato-mixte : stato et superstato.

La principale difficulté consiste à la trop longue durée de combustion qui se termine après la tuyère, donc sans effet utile, d'où l'emploi de l'hydrogène. Quelques tentatives avec un carburant spécial américain ont échoué, le stato ne s'étant pas allumé.

- Il y a 65 ans, en 1958, le SE.4400 réalisé à Cannes, atteignait déjà Mach.3,7 et montait à 67 km d'altitude. Pas trop mal !