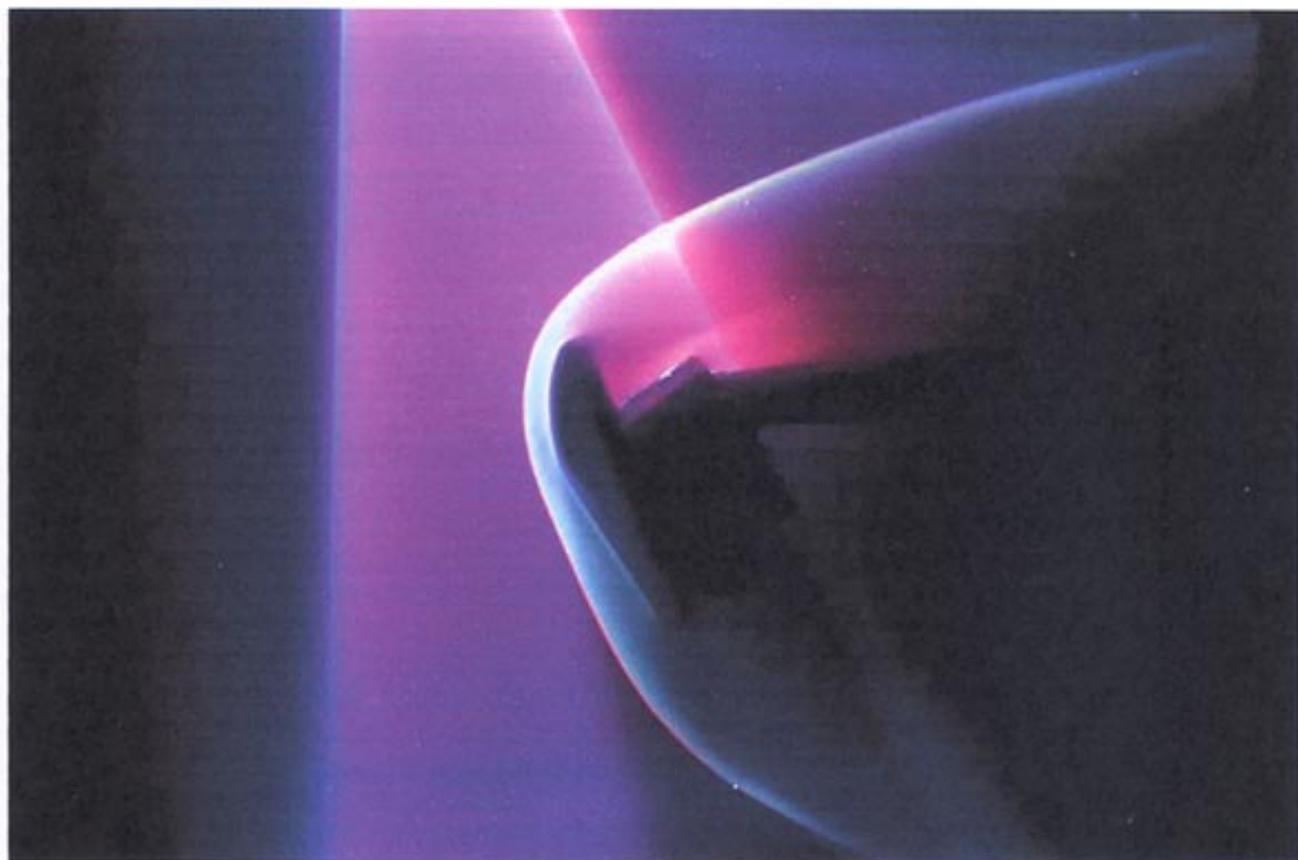


# Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon

Bulletin n° 136

Juin 2014

## Les souffleries de l'Onera à Meudon



*Test d'une capsule martienne en soufflerie hypersonique à Meudon,  
à Mach 10, soit 1,5 km/s à la t° d'écoulement de 50 °K = -223 °C*

### *Sommaire*

Éditorial, par Michel Colchen	p. 2
Les souffleries du centre Onera de Meudon, du subsonique à l'hypersonique, par Bruno Chanetz	p. 3
Nouvelles brèves, par Yves Terrien	p. 12

**Prix : 5 €**

# Éditorial

Pour de nombreux meudonnais, notamment les anciens, l'Onera (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales) est avant tout la Grande Soufflerie, qui, lorsqu'elle fonctionnait, faisait trembler les maisons et les immeubles du voisinage...

La Grande Soufflerie ne fonctionne plus depuis plusieurs années. Classée Monument historique, on pouvait encore récemment la visiter lors des Journées du Patrimoine. Mais ce n'est plus possible car l'enveloppe en béton se fragmente en petits blocs qui risquent de blesser les visiteurs.

Monsieur Bruno Chanetz, maître de recherche à l'Onera, a récemment, dans le cadre des conférences de l'Université Inter-Âge de Meudon, fait plusieurs exposés sur les souffleries qui ont beaucoup intéressé l'auditoire.

Compte tenu de la qualité des exposés, nous l'avons sollicité pour qu'il écrive un article pour notre bulletin, que nous présentons ici.

Depuis les exploits du capitaine Ferber, au début du XX<sup>ème</sup> siècle sur le site de Chalais-Meudon, jusqu'aux tests en hypersonique sur ce même site, l'auteur nous retrace dans leur cadre historique, par un texte de lecture aisée illustré de schémas et de photos de qualité, les différentes étapes de cette évolution.

On retiendra que le site de Chalais-Meudon s'inscrit pleinement comme un centre important de recherches sur l'aérodynamique appliquée maintenant dans le domaine spatial, et que les méthodes de modélisation numérique qui y ont été développées trouvent leur application dans des domaines très variés.

Alors que les laboratoires de recherches du CNRS, dynamisés dans les années 60 par la venue à Bellevue du général de Gaulle, alors Président de la République, ont quitté Meudon, le centre de Bellevue étant consacré à l'information et à la communication, la qualité de Meudon comme centre de recherches perdure avec la présence du centre de recherches de l'Observatoire de Paris-Meudon, mais aussi avec l'Onera, dont on annonce cependant périodiquement le départ.

En vous souhaitant une bonne lecture et un agréable voyage vers l'hypersonique...

Bien cordialement,

Michel Colchen

Président du CSSM

# Les souffleries du centre Onera de Meudon :

## du subsonique à l'hypersonique

Voler plus haut, plus vite, préserver la vie des pilotes d'essais et des passagers, autant de défis relevés par l'homme depuis l'aube du XX<sup>ème</sup> siècle, quand les pionniers de l'aviation s'attachèrent à faire décoller des engins plus lourds que l'air et à les maintenir en sustentation. Contemporaines des premiers exploits aériens, les souffleries aérodynamiques, en recréant artificiellement les conditions rencontrées lors d'un vol, ont puissamment concouru aux progrès de l'aéronautique.

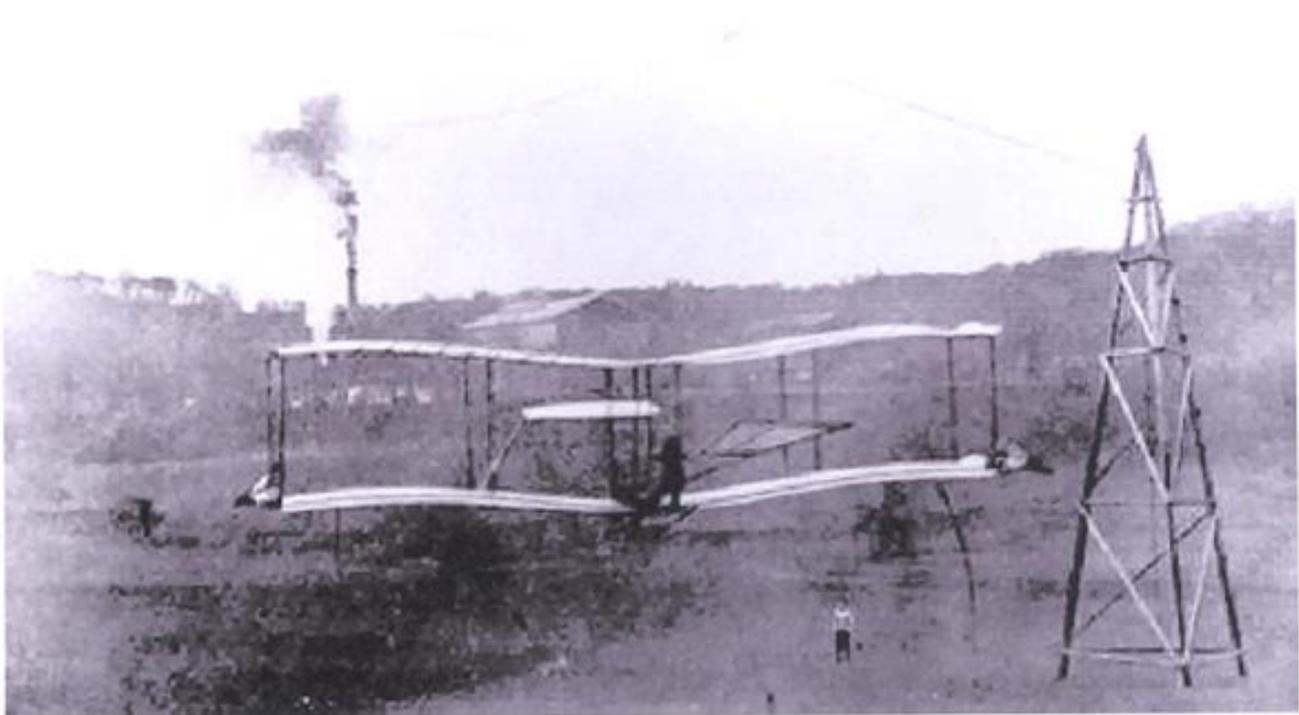
Le centre de Chalais-Meudon est riche d'une histoire déjà plus que centenaire en ce qui concerne l'aviation. Elle commence avec les exploits du capitaine Ferber au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Elle se poursuit avec la construction de la Grande soufflerie entre 1929 et 1935 sous l'égide du ministère de l'Air. Enfin, l'affectation en 1946 du site de Chalais-Meudon à l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (Onera) consacre le centre à la recherche pour l'aéronautique et le spatial avec l'installation

de nouvelles souffleries permettant d'atteindre des vitesses jusqu'à 5 400 km/h [1].

### Naissance des souffleries et moyen alternatif proposé par Ferber à Meudon

Inventées à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, les souffleries ont pris leur essor au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Le procédé repose sur un principe déjà énoncé par Newton : les forces qui s'exercent sur un corps plongé dans un fluide sont les mêmes, que le corps se déplace à travers le fluide au repos avec une certaine vitesse, ou que le fluide se déplace par rapport au corps immobile avec la même vitesse relative.

La « soufflerie » aérodynamique porte un nom impropre, puisqu'elle est toujours désignée par le moyen de mise en mouvement de l'air des premières installations - au moyen d'un ventilateur qui soufflait de l'air en amont d'un tunnel - alors que très rapidement on a préféré disposer le ventilateur en aval de la veine d'essai, d'où un mode de



*Fig. 1 - Tyrolienne du capitaine Ferber à Chalais-Meudon*

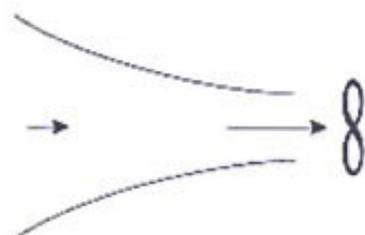
fonctionnement par aspiration. Le nom initial de « soufflerie » est resté en Français.

Les souffleries ont contribué à réduire le nombre d'accidents, sauvant ainsi la vie des pilotes et préservant le matériel. Elles ont aussi permis de passer du flair des constructeurs à l'art de l'ingénieur.

Ce moyen d'investigation expérimental, très commode, s'est rapidement imposé au détriment des moyens alternatifs reposant sur le déplacement direct de l'objet dans l'air. Ce fut notamment le cas de la tyrolienne, qui profite des effets de la gravité, pour mettre en mouvement l'avion le long d'un câble tendu entre des pylônes. Ce moyen, expérimenté en 1904 par le capitaine Ferber à Chalais-Meudon, profitait de la déclivité du vallon de Meudon pour lancer horizontalement, après une descente, l'avion suspendu à un chariot glissant le long du câble tendu. Gustave Eiffel avait aussi envisagé un tel dispositif – qu'il avait appelé aérodrôme – à partir du premier étage de sa tour, avant d'entreprendre la réalisation d'une soufflerie.

## Les souffleries de Gustave Eiffel au Champs-de-Mars et à Auteuil

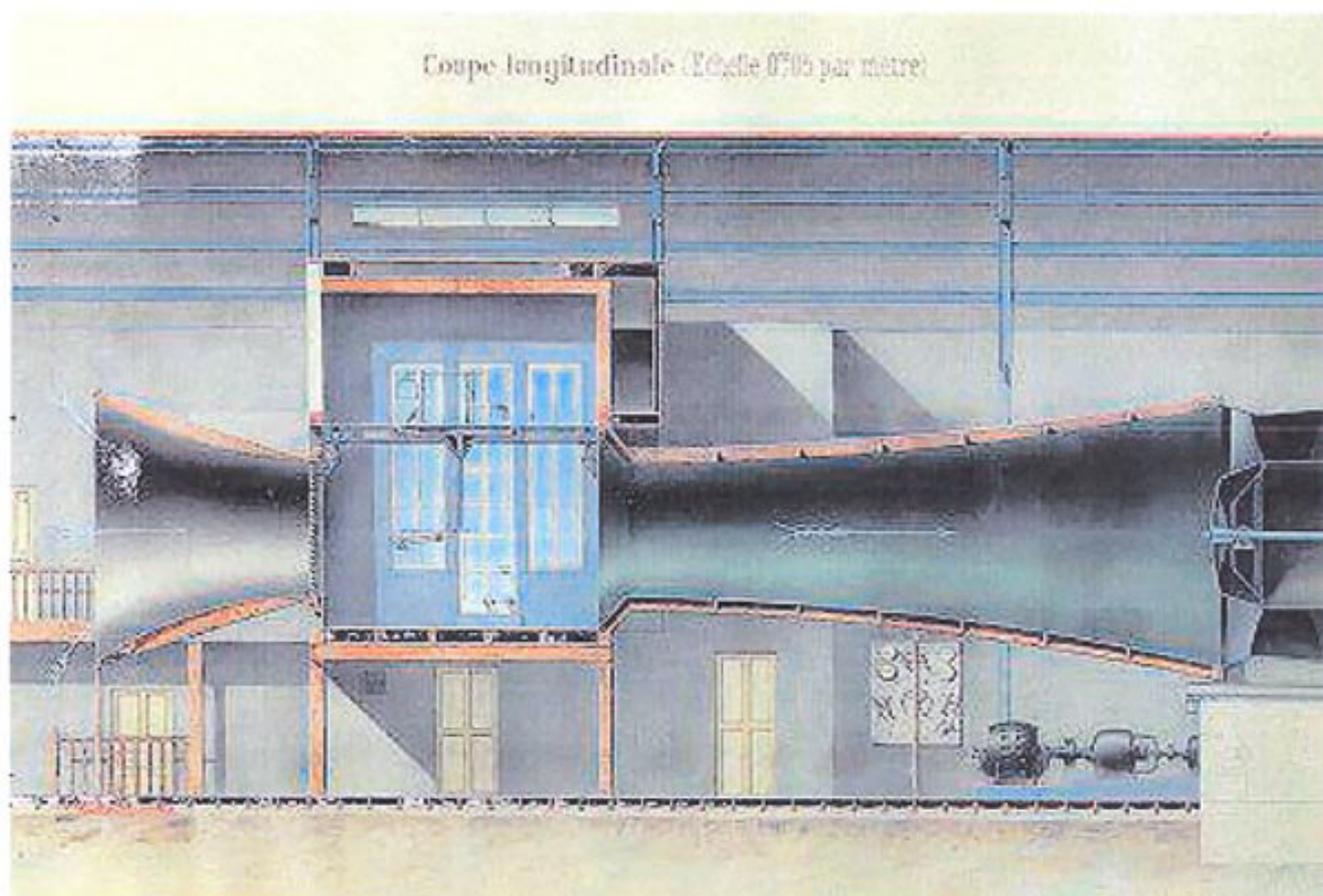
La première évolution des souffleries consiste dans le passage du soufflage à l'aspiration ; ainsi le sillage du ventilateur, placé en aval de la veine d'essai, ne perturbe plus la maquette.



*Fig. 2 - Convergent avec ventilateur en aval de la veine d'essai*

Une deuxième évolution consiste dans l'introduction du collecteur - pièce convergente disposée en amont de la section d'essai - qui permet d'augmenter la vitesse dans cette section en vertu de la loi de conservation du débit-masse :

$$V \times S = \text{Constante}$$

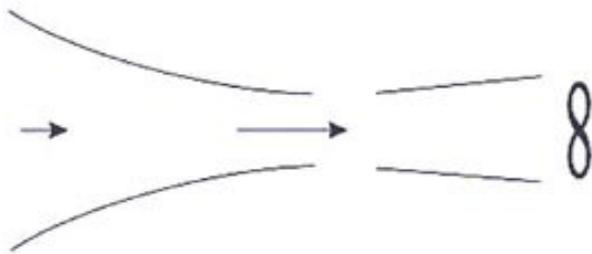


*Figure 3 - Dessin aquarellé de la soufflerie Eiffel d'Auteuil*

(en écoulement incompressible), où  $V$  est la vitesse dans la section courante et  $S$  la surface de cette section.

La vitesse augmente ainsi dans le même rapport que la surface de la section droite diminue.

Gustave Eiffel est à l'origine d'une troisième évolution dans l'art des souffleries. Il intercale une pièce divergente – le diffuseur – entre la veine d'essai et le ventilateur situé en aval. C'est une innovation majeure, puisqu'elle permet de diminuer drastiquement la puissance nécessaire à l'installation.



**Fig. 4 - Soufflerie de type Eiffel, munie d'un convergent et d'un diffuseur**

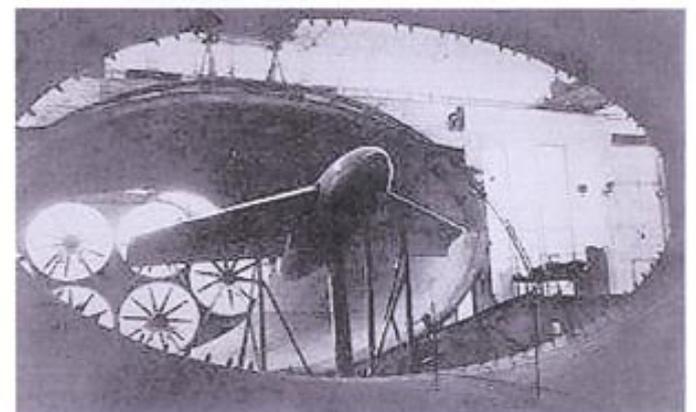
L'efficacité de ce dispositif découle de la loi de Bernoulli, qui stipule que pression et vitesse varient en sens inverse. De fait le diffuseur, en diminuant la vitesse, a pour effet de comprimer l'air. La différence de pression de part et d'autre du ventilateur est alors très inférieure à celle qui règne lorsque le ventilateur est situé directement en aval de la section d'essai. Eiffel résume ainsi la situation : « Le diffuseur économise donc en somme les deux tiers de la puissance. L'avantage de ce système de récupération est manifeste » [2].

La soufflerie de type Eiffel, achevée en 1912 à Auteuil, bénéficie de l'invention du diffuseur. Elle provient du transfert de la première soufflerie de Gustave Eiffel, installée au Champs-de-Mars aux pieds de la Tour Eiffel en 1909. La soufflerie du Champs-de-Mars atteignait une vitesse de 18 m/s dans une section d'essai circulaire de 1,5 m de diamètre. Elle était mue par un ventilateur actionné par un moteur de puissance 50 chevaux. Avec ce même moteur transféré du Champs-de-Mars à Auteuil, la nouvelle soufflerie, dotée d'un diffuseur, atteint 32 m/s

dans une section de 2 mètres de diamètre, soit un gain en débit de 200 %.

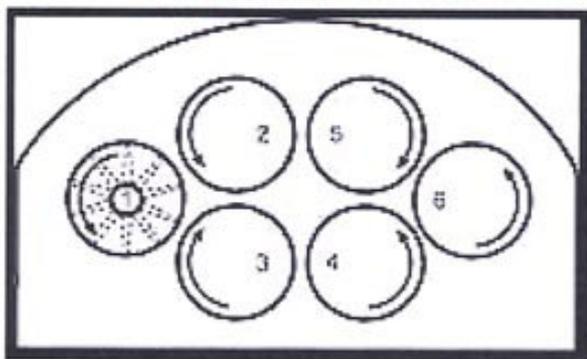
### **La Grande Soufflerie S1Ch de Chalais-Meudon**

C'est Antonin Lapresle, collaborateur, puis successeur d'Eiffel à la soufflerie d'Auteuil, qui construit de 1929 à 1935, à la demande du Ministère de l'Air, la grande soufflerie de Chalais-Meudon. De type Eiffel bien sûr, elle est munie d'un convergent de rapport de réduction 3,5 faisant passer d'une embouchure de surface 350 m<sup>2</sup> à une section de veine d'essai de surface 100 m<sup>2</sup>, permettant ainsi d'atteindre une vitesse maximale de 180 km/h. Son diffuseur, constitué d'un tube tronconique géant de section elliptique d'axe vertical 10 m et d'axe horizontal 18 m, est réalisé en voile de béton armé mince d'une épaisseur de 7 cm pour 38 mètres de longueur. En aval du diffuseur, la chambre d'aspiration, dotée de six ventilateurs de 1000 chevaux chacun permettant l'extraction de l'air.

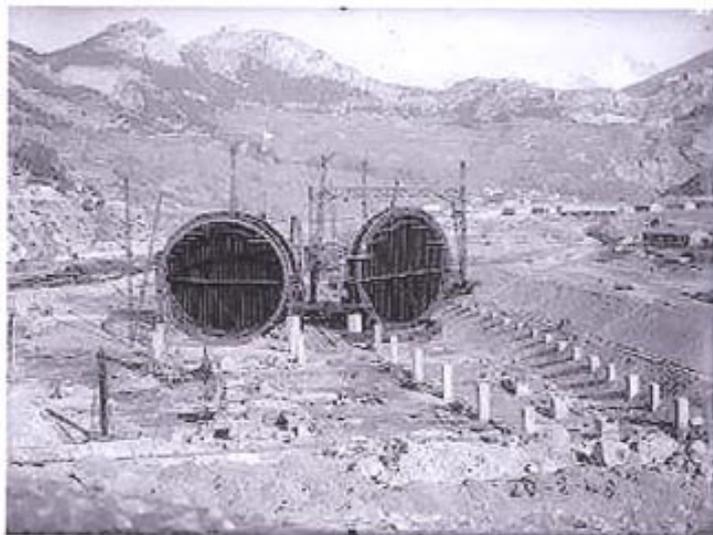


**Fig. 5 - La Grande Soufflerie de Meudon (vue extérieure et intérieure). Dans la section d'essai, un avion de combat SO 6020.**

Devenue obsolète, l'installation est désaffectée en 1977. Classée Monument historique en 2000, elle reste l'emblème du centre de Meudon. Durant vingt ans de 1950 à 1970, cette installation a été utilisée intensivement. Deux équipes assuraient son fonctionnement de 6 h le matin à 22 heures le soir. Elle a permis de tester, au cours de nombreux programmes nationaux, l'aérodynamique des avions, mais aussi des automobiles et des bâtiments.



**Fig. 6 - Les ventilateurs de S1Ch vus de la section d'essai (puissance totale 4,4 MW). Les sens de rotation différents des ventilateurs évitent une rotation d'ensemble de l'air**



**Fig. 7 - Construction de la soufflerie à Modane en 1946 et site actuel**

## La soufflerie transsonique S3Ch

En 1945, la France décide de rapatrier d'Autriche - comme prise de guerre - une soufflerie sonique capable d'atteindre la vitesse du son, soit 1 200 km/h, dans une veine d'essai de 8 mètres de diamètre [3].

Le site de Modane en Savoie est retenu pour héberger cette gigantesque installation d'une puissance de 88 MW. Cependant il apparut rapidement indispensable au conseil scientifique de l'Onera de faire des vérifications avant de terminer la construction de la soufflerie de Modane. Aussi une soufflerie à échelle réduite S3Ch (1/8) fut-elle réalisée en urgence sur le site de Chalais-Meudon en utilisant des moteurs JUMO de récupération et en commandant les ventilateurs à la société allemande Dingler. Il importait en effet que cette soufflerie pilote fût opérationnelle le plus vite possible afin d'en tirer tous les enseignements applicables à la future soufflerie de Modane. Les fabrications démarrèrent sans qu'aucun contrat n'eût été passé. Ainsi que le résume Marcel Pierre, l'acteur principal du rapatriement en France de la soufflerie allemande : « Il s'agit en quelque sorte d'une prime à la Grande Soufflerie ». Cette soufflerie S3Ch de Chalais-Meudon fonctionne à partir de juin 1948, fournissant des renseignements très utiles pour la mise au point de la soufflerie de Modane [3]. Elle permet d'atteindre la vitesse du son et, comme



le souligne l'ingénieur général de l'armement Paul Dumanois, « avec sa veine de 1m de diamètre, ce n'est pas seulement une maquette, mais une soufflerie de recherche particulièrement précieuse » [3]. Au sein du Département d'Aérodynamique Fondamentale

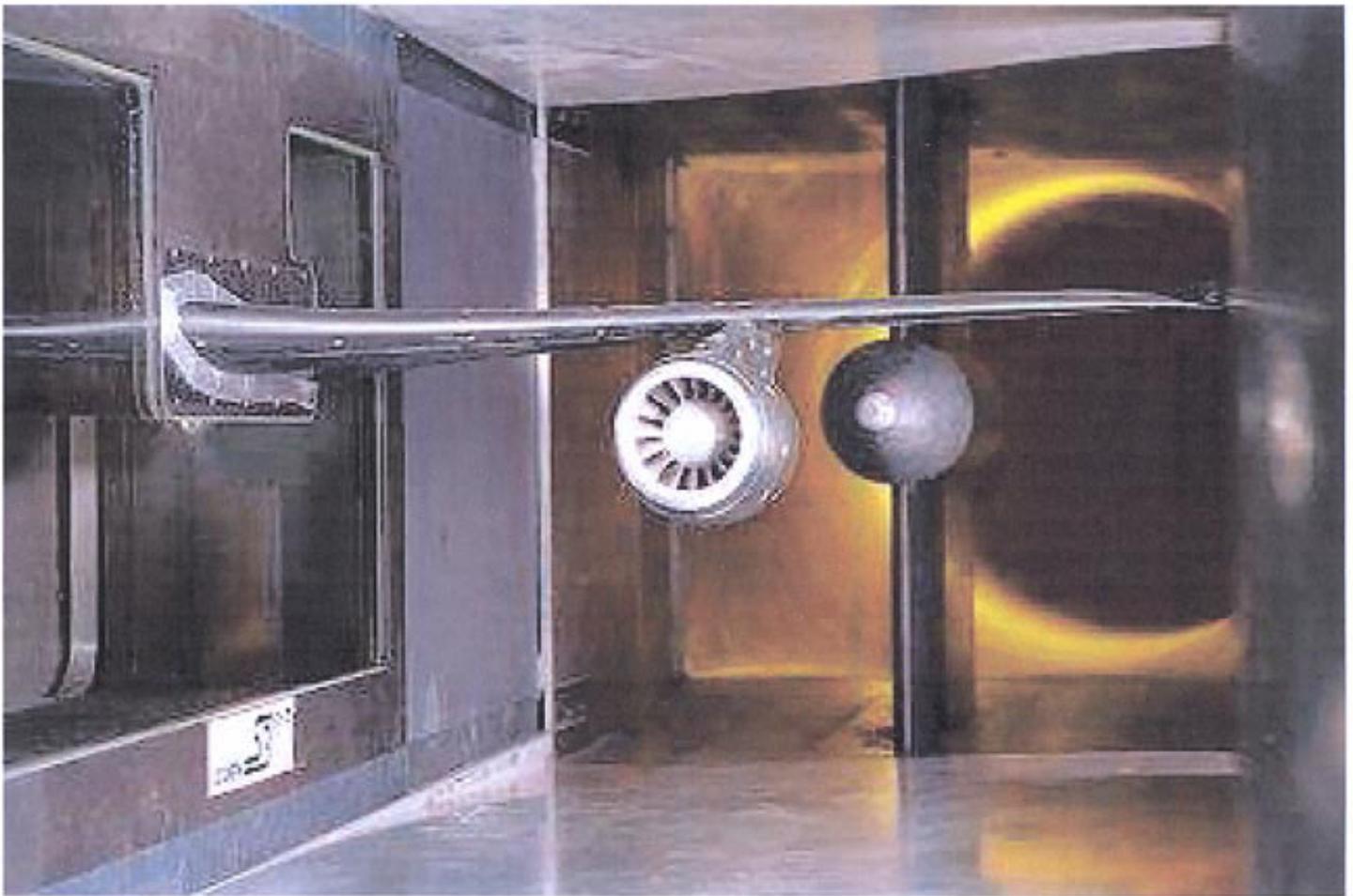
et Expérimentale (DAFE) de l'Onera, la soufflerie S3Ch fournit encore aujourd'hui des résultats de grande qualité pour la recherche et l'industrie aéronautique [4].



*Fig. 8 - La soufflerie S3Ch du centre de Meudon après la rénovation de 1986.*

Cette installation fut rénovée en 1986. Il lui fut substitué une veine sensiblement carrée de section 0,76 m sur 0,80 m pour une longueur de 2,20 m, munie de parois rigides pleines ou perforées et surtout de parois déformables auto-adaptables. Ces dernières permettent la simulation d'une atmosphère illimitée autour d'un profil d'aile, les parois horizontales haute et basse de la veine d'essai reproduisant alors le contour des lignes de courant d'un écoulement uniforme à l'infini. L'air est mis en mouvement au moyen d'un groupe moto-ventilateur à deux étages de 3,5 MW de puissance. Un échangeur de chaleur, situé dans le collecteur, évite que l'air

s'échauffe en cours d'essais pouvant durer de 2 à 3 heures. Les capacités de cette soufflerie en font un moyen d'essai privilégié pour les études d'avions civils ou militaires, de missiles ainsi que des lanceurs spatiaux dans leur phase ascensionnelle transsonique. Elle est utilisée de manière récurrente pour les essais d'interaction nacelle-voilure et de maintien de la laminarité sur les profils d'aile au profit du développement des avions de la gamme Airbus. Les autres clients réguliers sont Dassault Aviation, MBDA, le groupe Safran, le Cnes, ainsi que la Délégation Générale de l'Armement (DGA) pour des projets amont.



**Fig. 9 - Veine de la soufflerie S3Ch avec maquette motorisée d'aile d'A340**

### La soufflerie supersonique S5Ch

La course à la vitesse a rendu nécessaire la réalisation d'installations encore plus performantes en termes de vitesse et la création de souffleries supersoniques, qui atteignent des vitesses plus grandes que celle du son, soit des nombres de Mach supérieurs à 1, le nombre de Mach étant le rapport de la vitesse de l'écoulement  $V$  à la vitesse du son  $c$  :

$$M = V/c.$$

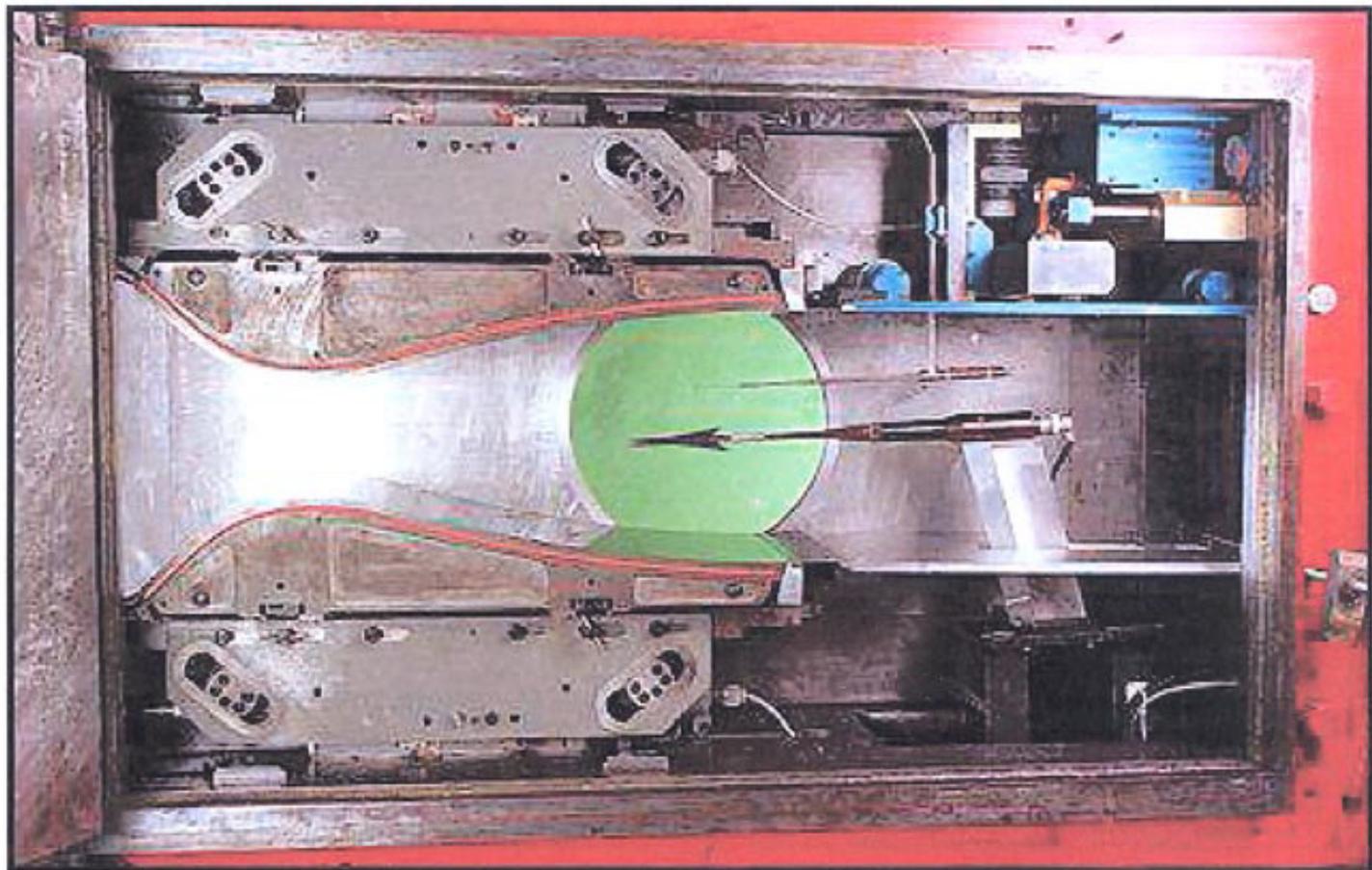
Les écoulements supersoniques [5] obéissent à des lois fondamentalement différentes de celles qui régissent les écoulements subsoniques. La relation d'Hugoniot, où figure le nombre de Mach  $M$ , qui permet de discriminer ces deux états, exprime en l'absence de frottement la relation entre la vitesse  $V$  du fluide et la section  $A$  du tube de courant contenant ce fluide :

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{dV}{V}$$

Ainsi en subsonique ( $M < 1$ ),  $A$  et  $V$  varient en sens inverse, la vitesse croissant dans des sections convergentes, alors qu'en régime supersonique ( $M > 1$ ), au contraire, la vitesse croît dans des sections divergentes. Il s'ensuit aussi que l'état sonique ( $M = 1$ ) ne peut être obtenu que pour  $dA = 0$ , c'est-à-dire dans une section minimale ou col.

En conséquence la réalisation d'une soufflerie supersonique requiert la mise en place d'une *tuyère* constituée d'un convergent, qui augmente la vitesse de l'écoulement jusqu'à l'obtention du nombre de Mach unitaire au col, suivi d'un divergent à l'intérieur duquel la vitesse de l'écoulement continue à augmenter pour passer en supersonique.

La soufflerie S5Ch a été construite selon ce principe. Elle entre en service en 1952 et dès 1953 on dépasse la vitesse du son (Mach 1) dans cette installation. Elle permet aujourd'hui l'obtention d'écoulements jusqu'à plus de trois fois la vitesse du son (Mach 3,2).



**Fig. 10 - Soufflerie supersonique S5Ch munie d'une tuyère Mach 2 (vent venant de la gauche). L'écoulement est contracté jusqu'à obtention de Mach 1 au col et se détend ensuite jusqu'à Mach 2 dans la section d'essai où est disposée la maquette d'avion**

Malgré sa veine d'essai modeste de 0,3 m sur 0,3 m, son fonctionnement requiert une puissance de 1,4 MW. En 1959, l'Onera se voit attribuer un contrat de recherches pour concevoir une « super caravelle », bientôt appelée Concorde, capable de transporter 100 passagers à Mach 2,2. Ce seront les heures de gloire de la soufflerie avec la mise au point des entrées d'air. Depuis la soufflerie a servi à de nombreux essais militaires ou civils.

### La soufflerie hypersonique R3Ch

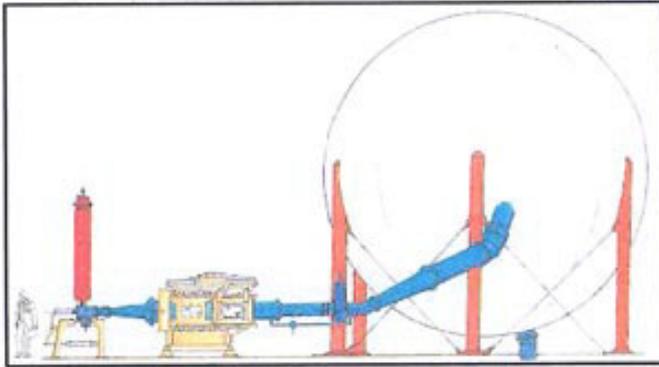
L'obtention d'écoulements au-delà de Mach 4 exige un chauffage préalable de l'air avant sa détente dans la tuyère sous peine de le liquéfier. Les écoulements à partir de Mach 4 ou Mach 5 sont souvent qualifiés d'écoulements hypersoniques. Ils concernent principalement le domaine des fusées ou des véhicules spatiaux. Outre un réchauffage de l'air en amont de la tuyère, les souffleries hypersoniques nécessitent une puissance accrue pour amorcer le col de la tuyère. Il faut en effet établir une différence de pression

entre l'amont et l'aval suffisante pour créer les conditions favorables à cet amorçage, soit une forte compression en amont ou une intense dépression en aval, ou la combinaison des deux effets. De fait, ce type de soufflerie, compte tenu des puissances mises en jeu, est le plus souvent « à rafale », c'est-à-dire qu'au contraire des souffleries continues, capables de souffler des heures durant, elles opèrent pendant une rafale, dont la brève durée - quelques secondes à quelques minutes - est déterminée par la capacité des réservoirs amont d'air comprimé ou celle des réservoirs aval de vide.

La soufflerie R3Ch du centre de Meudon, construite en 1965, fonctionne suivant le principe suivant avec, d'amont en aval :

- des réservoirs d'air comprimé à 250 bars
- un réchauffeur à effet Joule montant jusqu'à 1100 °K

- une tuyère Mach 10 permettant l'obtention de vitesse jusqu'à 5 400 km/h
- un caisson d'essai
- un diffuseur
- une sphère à vide de capacité 500 m<sup>3</sup> pour aspirer l'air éjecté du diffuseur.



**Fig. 11 - Schéma de principe de la soufflerie à rafale R3Ch**

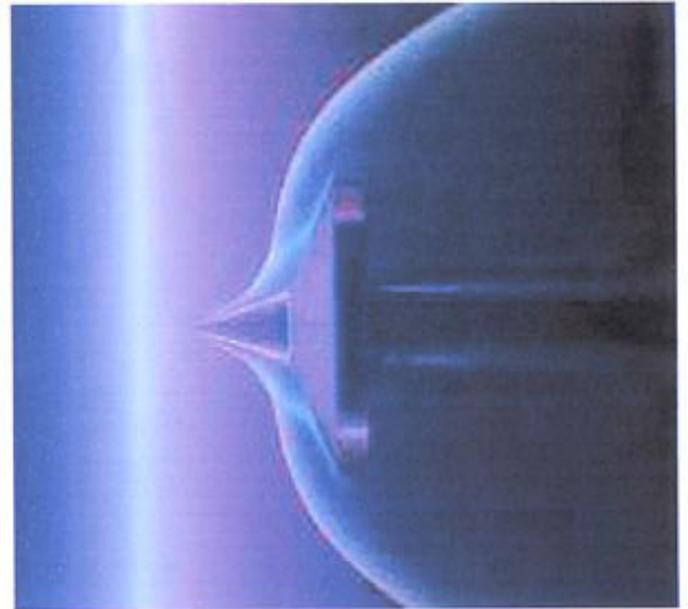
*De gauche à droite : le réchauffeur (en rouge), la tuyère (en bleu), le caisson à essai (en jaune), le diffuseur (en bleu), qui se poursuit par un tuyau (en bleu également), lequel aboutit à la sphère à vide (en blanc)*

Cette soufflerie permet des rafales d'une durée de 12 secondes. Elle a été mise à contribution pour les programmes Ariane et également lors du projet de navette spatiale européenne Hermès à la fin des années 80. Plus récemment elle a été utilisée pour des

### **Perspectives : vers la soufflerie numérique ?**

Dans les années 1980, l'avènement des ordinateurs de grosse capacité de calcul et le développement conjoint des méthodes numériques laissaient augurer la disparition à moyen terme des souffleries, certains experts se laissant aller à des prédictions de dates (15 ans ou 20 ans) qui se sont révélées aussi fausses que celles établies dans les années 1970 en ce qui concerne la disparition du pétrole à l'horizon 2000. C'est pourquoi il est sage de ne pas indiquer d'échéance pour l'abandon des essais aérodynamiques au sol, mais il est bien certain que tous les efforts réalisés dans le domaine numérique s'inscrivent dans la perspective de renoncer un jour à la soufflerie. Toutefois les nombreux projets de constructions de souffleries dans les pays émergents, notamment en Inde, montrent qu'en dépit de l'important développement du numérique, le recours à l'expérience est, dans le domaine de l'aérodynamique, toujours d'actualité.

essais dans le cadre du programme Mars Sample Return, destiné à la conception d'une capsule en vue d'une mission de retour d'échantillons martiens.



**Fig. 12 - Vue en soufflerie hypersonique (Mach 10) des ondes de choc se formant devant une maquette double-cône (le vent vient de la gauche)**

*La visualisation est obtenue au moyen d'un canon à électrons qui émet un faisceau ionisant les molécules d'azote de l'air. L'image est obtenue par post-luminescence*

## Références

[1] - Bazin M., Carpentier J., Chanetz B., Coët M.-C., Dang-Tran K., Délery J., Landré N. et Marec J.-P.

*De l'aérostation à l'aérospatiale, Le centre de Recherche de l'Onera à Meudon*

Editeur, Onera, 2007

[2] - Coët M.-C., Chanetz B. et Peter M..

*Gustave Eiffel, pionnier de l'aérodynamique*

Centraliens, la revue de l'association des anciens élèves de l'Ecole Centrale, n°617, avril 2012

[3] - Chanetz B., Coët M.-C. et Tensi J.

*La Grande soufflerie de Modane*

PEGASE, la revue du Musée de l'Air, n° 137, juin 2010

[4] - Coët M.-C. et Chanetz B.

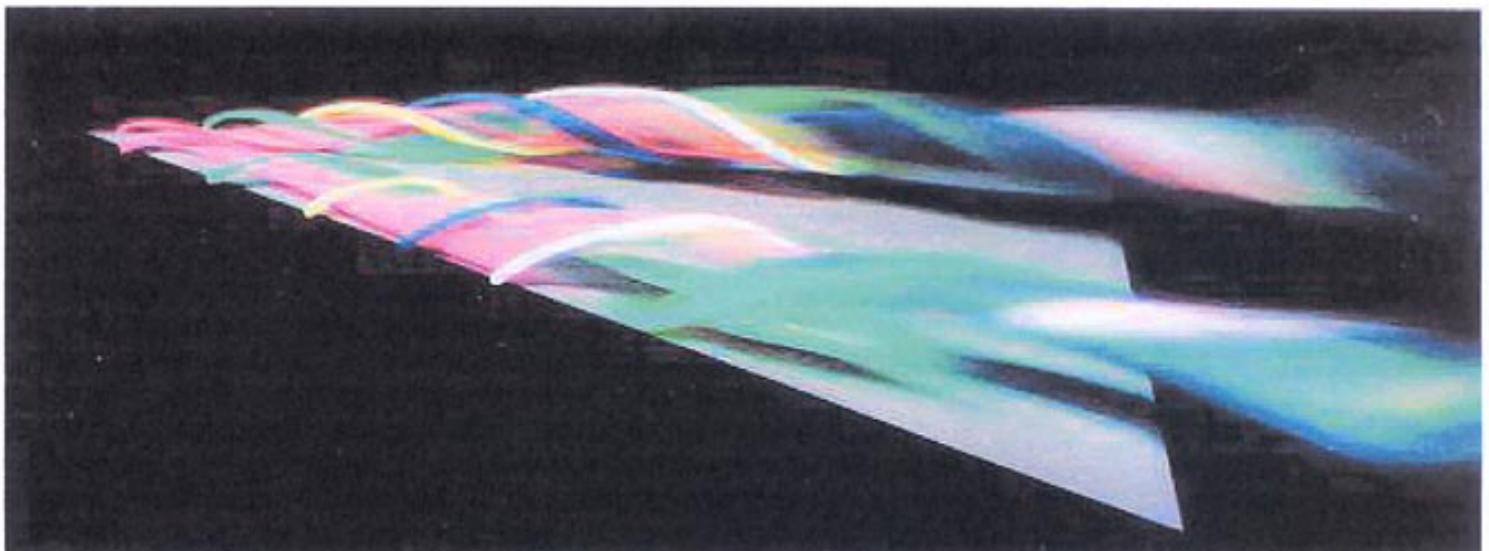
*Napoléon, un empereur dans le vent*

AeroFrance, la revue de l'Aéroclub de France, n°120, 2<sup>ème</sup> trimestre 2012

[5] - Chanetz B., Délery J. et Veuillot J.-P.

*Aérodynamique, pp 271-277 + encart XVI-XVII*

Encyclopaedia Universalis, 2008



*Tourbillons sur une aile delta visualisés par injection de colorants dans un tunnel hydrodynamique de l'Onera*

# Nouvelles brèves

par Yves Terrien

(Consulter aussi notre site [www.sauvegardesitemeudon.com](http://www.sauvegardesitemeudon.com))

## - Colloque de septembre 2013 (suites) :

Une réunion a eu lieu à la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC/Île-de-France) afin de mettre sur pied le « comité de suivi » des actions de sauvegarde, entretien et rénovation du Domaine National de Meudon, en particulier de sa partie sud (étang de Chalais et Hangar Y). La création en avait été décidée lors du colloque à l'Orangerie en septembre dernier. Nous vous tiendrons informés des propositions issues des discussions au sein de cette instance.

## - Tapis Vert :

Il n'y a toujours pas de solution trouvée pour l'entretien (pourtant de coût modeste) de cette partie importante de la Grande Perspective.

## - CNRS :

Les projets de transformation du site de Bellevue avancent. Rappelons que des logements (~200) seront construits sur une large partie du site et que, en échange de la cession du terrain correspondant, des bâtiments nouveaux seront construits sur la partie restante, gardée par cet organisme. Il serait souhaitable qu'une large information soit donnée et que la concertation se développe avec les habitants du quartier Bellevue, ceux-ci étant très concernés par le projet. Un avant-projet peut être consulté sur les sites :

<http://engelmann-architectes.com/fr/projet/15> et <http://www.mo-foucrasarchitecte.com/#!meudon-92/c24i>

## - Aménagement du quartier de la gare de Meudon-Val Fleury :

Les travaux de construction des trois immeubles près de la gare de Meudon-Val Fleury avancent rapidement, mais le réaménagement du carrefour de la gare et de la circulation des piétons et véhicules, dans l'ensemble du quartier, est au point mort. Vu l'espace disponible laissé par les constructions nouvelles, ce réaménagement sera difficile.

## - Avenir du CSSM :

Un groupe de réflexion mandaté par le Bureau du CSSM s'est réuni plusieurs fois pour réfléchir sur l'avenir de notre association. Des pistes sont en cours d'élaboration et seront présentées au Conseil d'Administration pour fixer les orientations de nos activités à venir en prenant en compte l'évolution de notre ville, et pour améliorer notre communication vers les générations plus jeunes, nos adhérents de demain. Nous vous en tiendrons bien sûr informés.

## - Forêt Propre :

L'opération Forêt Propre 2014 a renouvelé le succès des années précédentes avec 4 tonnes de déchets collectés et 250 participants, malgré la défaillance de dernière heure de plusieurs groupes de scouts. L'opération avait été bien annoncée par les supports de communication de la Mairie de Meudon. Nous regrettons toutefois que la participation des adhérents CSSM soit largement minoritaire.

## - Divers :

Les Journées du Patrimoine 2014 auront lieu les 20 et 21 septembre prochain. Le CSSM organisera à cette occasion plusieurs visites, qui figureront dans la brochure de présentation de la mairie et sur le site dédié de la Drac (Direction Régionale des Affaires Culturelles).

## **Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon**

Siège Social : 6 avenue Le Corbeiller, 92190 Meudon, tél. : 01 45 34 30 09

Site internet : [www.sauvegardesitemeudon.com](http://www.sauvegardesitemeudon.com)

Directeur de la Publication : Michel COLCHEN. Rédacteur en chef : Yves TERRIEN.

Impression : FORMS, 3 rue du Ponceau, 92190 Meudon

Dépôt légal : juin 2014 – N° ISSN 1147-1476