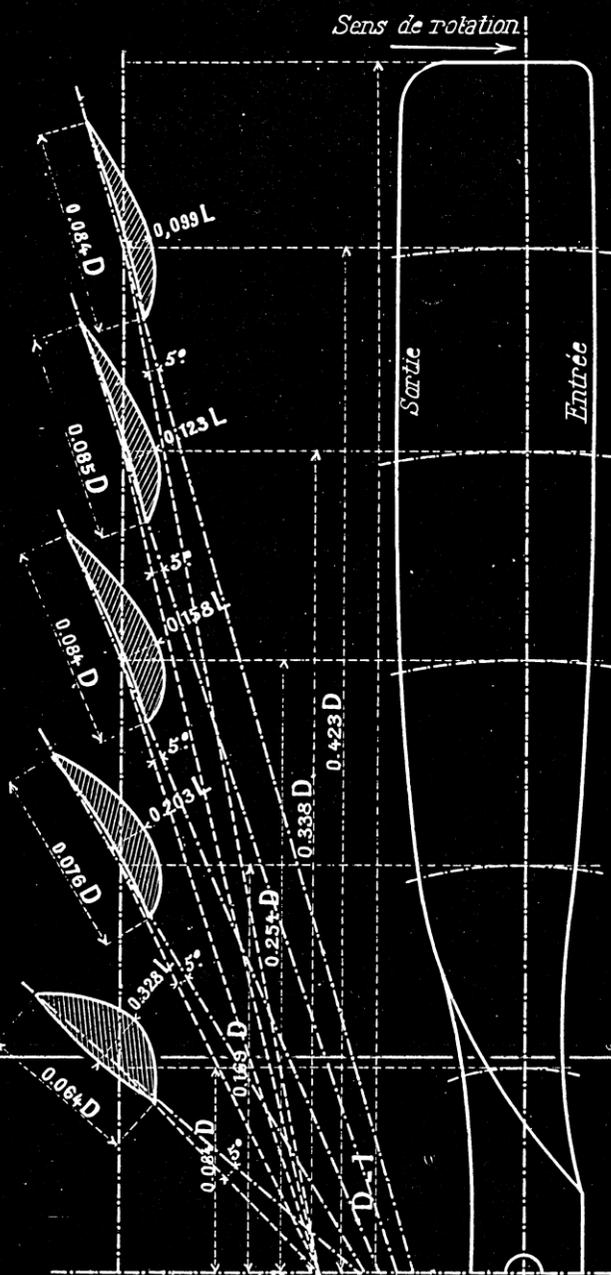


The air propeller tests of W.F. Durand and E.P. Lesley. A case study in technological methodology (1979).*

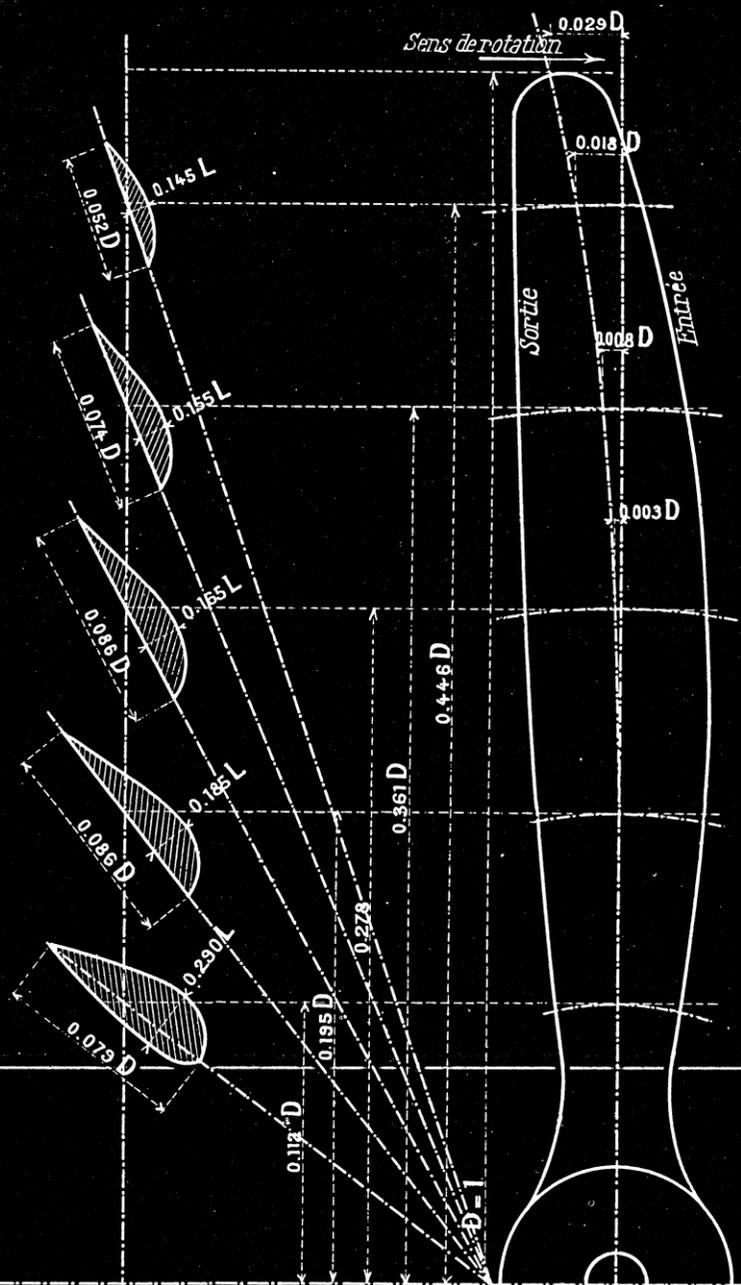
Walter G. Vincenti
Aeronautical engineer.

Dessins d'hélices diverses. Extrait des études sur l'hélice aérienne par G. Eiffel, 1920.

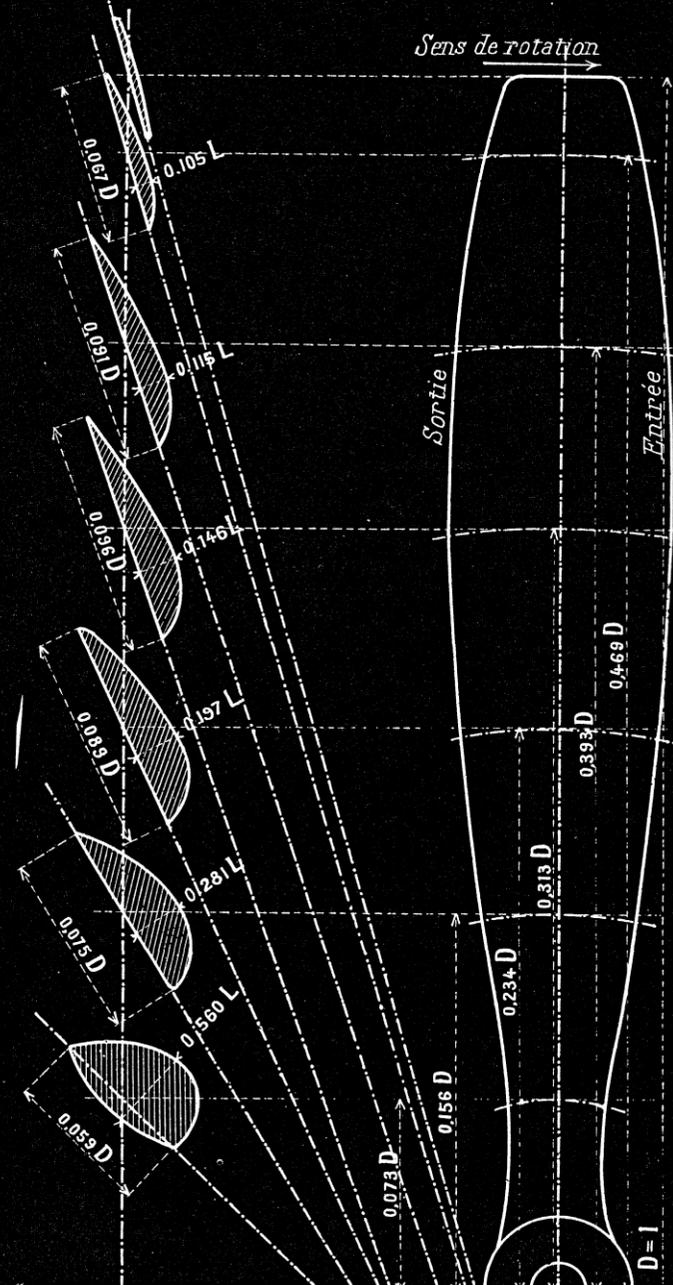
HÉLICE ÉTALON



DURAND I



RATMANOFF 2



Walter G.
Vincenti.

Ingénieur en aéronautique.

Une étude de cas sur la méthodologie technique*

Les tests relatifs à l'hélice de W.F. Durand.

L'hélice aéronautique de W.F. Durand et E.P. Lesley: un exemple des méthodes utilisées en technologie.

Deux professeurs de mécanique appliquée à l'Université de Stanford, William F. Durand et Everett P. Lesley, ont fait, entre 1916 et 1926, un travail sur l'hélice aéronautique, travail décrit à cette époque comme « le plus parfait et le plus complet... publié à ce jour ». C'est à partir de ces travaux essentiellement expérimentaux que les constructeurs d'avions des années 1920 ont dessiné de nouveaux avions. Ce sont eux qui ont aidé à établir les bases de la recherche aéronautique de l'entre-deux-guerres. Extrêmement marquants dans l'histoire de l'aéronautique, ces travaux ont, en outre, abouti à un modèle de méthodologie utilisé par les ingénieurs. Cette méthodologie, bien que fort riche en informations, a été jusqu'à maintenant négligée par les historiens. Afin d'y remédier, cet article se propose dans un premier temps de détailler le contexte, les événements et les méthodes associées au travail de Durand et Lesley ; puis, à la lumière de cet exemple, nous étudierons le problème de la méthodologie en technologie dans un cadre plus large.

Nous nous pencherons essentiellement sur le problème de la recherche en technologie, sur ses objectifs, sur les particularités de ses méthodologies, et sur les différences entre recherches en technologie et science fondamentale. On cherchera à savoir s'il existe réellement des méthodes technologiques et, si oui, quelles sont leurs caractéristiques, et à quelles aspirations elles répondent. Jusqu'à présent, les études en ce domaine ont été pour la plupart théoriques et abstraites¹. En revanche, le travail de Durand et Lesley nous apporte une foison de faits concrets, qui nous permettent de comprendre que les méthodes de recherche en technologie diffèrent, aussi bien dans leur forme que dans leur finalité, de celles des sciences physiques. Notre travail touche donc au débat sur les relations technologie-science, et aux défauts des modèles dominants d'interaction technologie-science².

On étudiera ensuite un certain nombre de thèmes associés à ce problème, tels que l'influence déterminante du dessin dans la technologie, la nature du savoir technologique, la convergence du savoir et de la méthodologie dans différents domaines de la technologie (en particulier dans le génie naval et l'aéronautique), et le rôle des changements discrets (par opposition aux grandes innovations). Une étude de ce genre a l'avantage de pouvoir élucider un large éventail de problèmes historiques et philosophiques³.

CADRE ET CONTENU DE LA MÉTHODOLOGIE.

Ce sont les travaux de John Smeaton au début de la révolution industrielle britannique qui constituent le premier véritable exemple de méthodologie en technologie. Cette étude de premier plan sur les roues à aubes et les moulins à vent, met en évidence deux composantes méthodologiques : d'une part, une méthode systématique d'expérimentation, d'autre part, l'emploi de modèles miniaturisés. Il n'existe pas d'étude complète de ces travaux ; il convient donc d'en tracer les grandes lignes car ces deux composantes — tantôt associées, tantôt autonomes — constituent la base de la recherche technologique.

La méthode expérimentale de Smeaton, que l'on trouve dans ses expériences sur la roue à aubes, consistait à varier les conditions de fonctionnement de cette roue (vitesse et quantité d'écoulement d'eau, et vitesse de rotation) et à mesurer la puissance. Il suivait donc ce que nous appelons aujourd'hui la méthode « de variation paramétrique », c'est-à-dire le procédé de mesure répétée des caractéristiques des matériaux, des processus ou des mécanismes pendant la modification systématique des paramètres qui définissent l'objet de l'étude ou ses conditions de fonctionnement. En plus de ces travaux sur la roue à aubes et les moulins à vent, Smeaton applique sa méthode de variations paramétriques à la préparation d'un ciment destiné à la construction du phare d'Eddystone, et à l'amélioration des moteurs à vapeur de type atmosphérique. A sa suite, d'autres ingénieurs ont utilisé cette méthode : William Fairbairn et Eaton Hodgkinson dans leur étude, en 1940, sur la déformation des tuyauteries métalliques, Frederick Taylor, entre 1880 et 1906, pour transformer le découpage du métal, Wilbur et Orville Wright, en 1901, pour réunir des informations sur les propriétés aérodynamiques. Plus significatif encore est aujourd'hui son emploi constant et familier par des milliers d'ingénieurs⁴.

Mais si les modèles réduits de Smeaton ont résolu certains problèmes, ils en ont en même temps soulevé d'autres. En effet, et c'est là le paradoxe, on ne peut pas transférer sans modification les résultats obtenus sur des modèles réduits à un prototype grandeur nature. Smeaton lui-même a insisté sur la nécessité de faire des expériences sur des modèles grandeur nature ; cependant, ses résultats sur les modèles réduits ont été indispensables pour le dessin industriel. De ce fait, il fallut un siècle avant que l'on puisse en voir les premières applications rationnelles, avec les expériences de William Froude sur la résistance des coques de bateau

(1868-1874). Ces applications, en effet, doivent s'appuyer sur une théorie de la similitude, théorie qui ne s'est développée que très lentement. Muni de cet outil théorique, le dessinateur peut transférer le profil d'un modèle réduit — c'est-à-dire ses conditions de fonctionnement — à un prototype grandeur nature. Grâce à cette loi de la similitude, Froude a pu calculer la résistance hydro-dynamique du navire *Greyhound* à partir des renseignements dérivés des modèles réduits. Il obtint des résultats si probants qu'il n'y a aucun doute sur la fiabilité de cette méthode.

Les quatre décennies qui ont suivi ont vu cette loi de la similitude n'évoluer que très lentement. Après Froude, les ingénieurs comprirent rapidement que le système mathématique des nombres sans dimension constituait la façon la plus simple d'exprimer cette loi. Ces nombres sans dimension — et avec eux les lois de la similitude — dérivent d'une forme ou d'une autre de l'analyse dimensionnelle. Les ingénieurs peuvent, en s'appuyant sur cette théorie, déduire à partir des dimensions de n'importe quel type de quantité, les limitations des caractéristiques relationnelles entre ces quantités. Ce principe fondamental fut formulé en premier par Jean-Baptiste Fourier dans son livre sur la théorie de la chaleur (1807-1822). Ce n'est cependant qu'à partir du dernier quart du XIX^e siècle que l'analyse sans dimension commence — avec les travaux de Lord Rayleigh en Angleterre, et ceux d'un certain nombre d'ingénieurs français — à être largement utilisée. Mais elle n'est pas complètement répandue parmi les ingénieurs lors des travaux de Durand et Lesley en 1916.

TECHNOLOGIE DES HÉLICES EN 1916.

Pour bien comprendre le travail de Durand et Lesley, il faut avoir quelques notions sur la technologie des hélices à cette époque. Le mécanisme de l'hélice transforme le pouvoir rotatif transmis par le moteur en un pouvoir propulsif qui fait avancer l'avion. Le travail de l'hélice est fonction à la fois du moteur et de la cellule, et doit être compatible avec la puissance motrice du premier et avec les exigences aérodynamiques de la deuxième. Cette compatibilité exige une hélice de forme et de taille appropriées, et le choix de cette hélice se faisait en 1916 en fonction d'un critère de vol assez étroit. Le perfectionnement du potentiel de propulsion nécessite une grande maîtrise des hélices. Quant au dessin de la cellule, son amélioration s'appuie sur une connaissance préalable des hélices et surtout sur l'adéquation entre sa structure particulière et une hélice appropriée. Cette adéquation présuppose l'utilisation de la méthode des variations paramétriques, c'est-à-dire des variations systématiques des paramètres qui définissent la géométrie de l'hélice et son fonctionnement.

Vers 1916, on savait construire des hélices, mais les données n'étaient pas traitées de façon systématique. A part les travaux des frères Wright en 1902-1903, il y avait eu peu de progrès aux Etats-Unis en aéronautique. En Europe, par contre, Stephan Drzewiecki avait, en Russie en 1885 puis en France, mis au point une théorie pour le calcul de fonctionnement des hélices à partir des mesures des propriétés aérodynamiques.

Dès 1910, les expériences sur les hélices étaient relativement répandues en Angleterre, en France et en Allemagne, et en 1913 les comparaisons faites en Angleterre entre résultats expérimentaux et théoriques montraient sans ambiguïté que si les informations découlant de la théorie n'étaient pas quantitativement exactes, elles étaient néanmoins qualitativement bien fondées et donc utilisables. On a pu atteindre au cours de ces expériences un taux d'efficacité de 70 à 80 %. Mais les seuls renseignements vraiment systématiques étaient fournis par Gustave Eiffel qui travaillait à Paris dans son laboratoire personnel¹. Celui-ci, de plus en plus intéressé par l'aéronautique, avait fait en 1914 des expériences sur trois familles d'hélices comprenant chacune quatre sous-catégories, dans un nouveau type de soufflerie. Dès 1911, il avait adopté pour ses recherches un système d'analyse basé sur la similitude et les nombres sans dimension. Il semble qu'en 1916, la plupart de ces travaux étaient connus aux Etats-Unis.

Les hélices navales ressemblent beaucoup aux hélices aéronautiques, mais le niveau des connaissances était très différent. Dès 1878 en effet, William Froude, qui étudiait le problème de la propulsion des bateaux, avait posé les premiers jalons de la théorie développée ensuite par Drzewiecki. Mais les architectes navals manifestaient alors si peu d'intérêt pour la théorie qu'ils ne cherchèrent pas à mettre en application les travaux de Froude. En revanche, il y avait dans le génie naval une grande tradition d'expériences systématiques. Durand, dont les travaux furent publiés en 1905, fut l'un des expérimentateurs les plus qualifiés de son temps. La grande expérience de Durand dans le génie naval, et surtout son utilisation de la méthode des variations paramétriques ont permis ultérieurement à Durand lui-même et à Lesley de réaliser des exploits dans le domaine de l'aéronautique.

EXPÉRIENCES DE DURAND ET LESLEY SUR LES HÉLICES.

Le travail fait à l'Université de Stanford sur l'hélice fut l'un des premiers projets subventionné par la N.A.C.A. (National Advisory Committee for Aeronautics). Durand, nommé à la N.A.C.A. par le président Wilson, proposa ce projet lors de la première réunion, le 23 avril 1915, projet qui reçut un accueil favorable. Cette commission avait été créée par le Congrès pour « superviser et diriger les études scientifiques sur les problèmes aéronautiques, dans l'optique de leur solution pratique... », mais sa raison d'être immédiate était de rattraper l'Europe en aéronautique. En effet, pour la N.A.C.A., les connaissances sur les hélices d'avion étaient, en même temps que l'élément de base des problèmes de vol, l'une des composantes de la supériorité européenne. Pour elle également, il y avait aux Etats-Unis « un nombre suffisant d'ingénieurs compétents dans le domaine de l'hélice à eau pour placer le dessin de l'hélice aéronautique à un niveau satisfaisant ».

L'un de ces ingénieurs était justement William Frederick Durand (1859-1958), qui avait travaillé à l'Université Cornell. Il fut également l'un des plus brillants ingénieurs de l'architecture navale et de

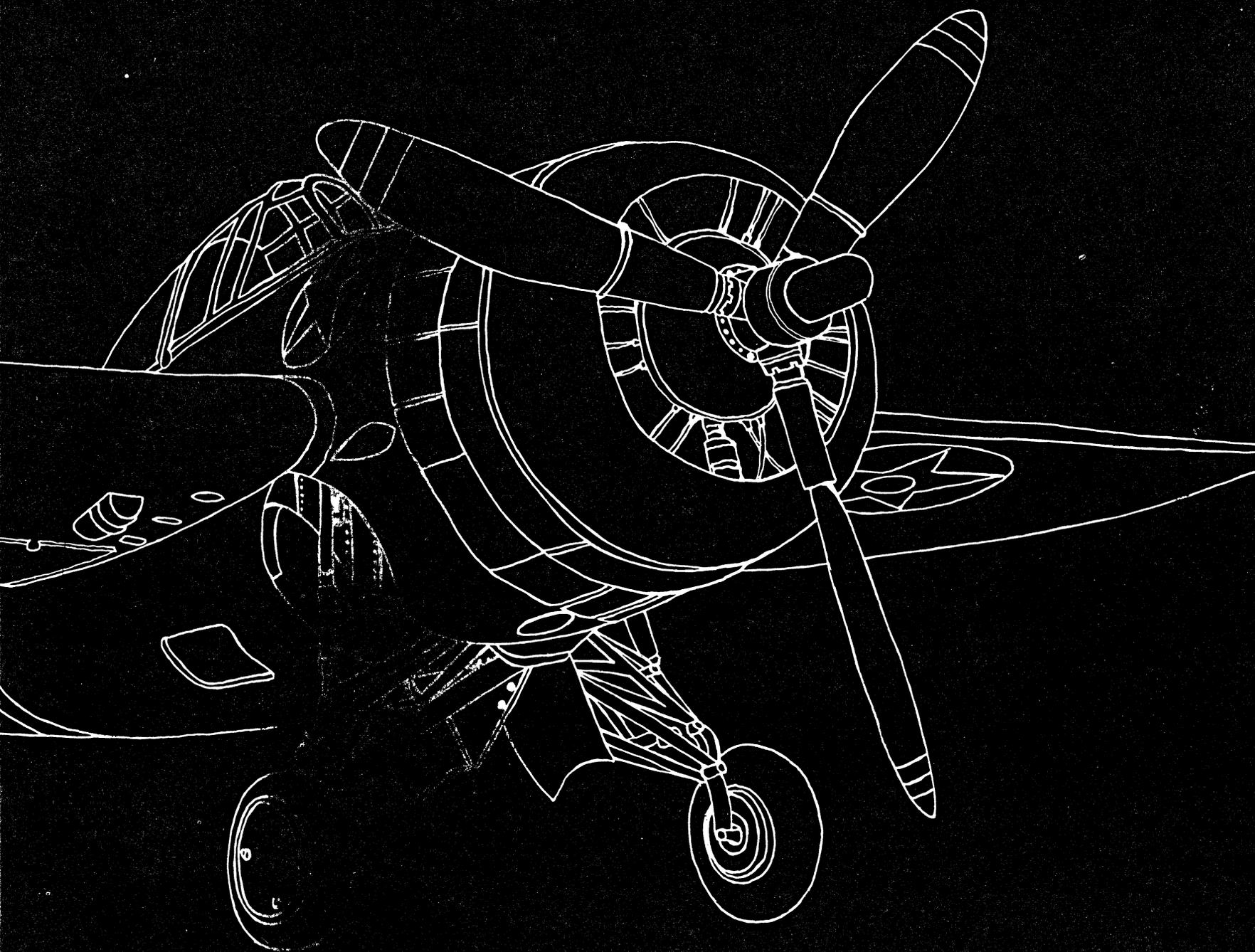
l'hydrodynamique de son temps. Capable d'originalité, il était plutôt un chercheur méthodique qu'un grand innovateur. Son approche était plutôt phénoménologique que mathématique et théorique.

Le projet proposé par Durand obtint en 1916 un contrat de recherche sur les hélices aéronautiques. Ce contrat avait pour objectif de chercher « des données susceptibles d'améliorer le dessin » non pas seulement de l'hélice, mais de l'hélice comme partie intégrante de l'avion. Pour l'aider dans ses travaux, Durand recruta Everett Parker Lesley (1874-1945) qui était également architecte naval et travaillait avec lui à Stanford. Ce dernier avait un talent polyvalent et une grande dextérité pour les expériences de laboratoire.

Durand envoya en novembre un document au constructeur naval et secrétaire de la N.A.C.A. Holden Richardson, document dans lequel il expliquait comment établir un modèle réduit d'hélice dont les paramètres varieraient systématiquement suivant les critères en vigueur. Les expériences sur l'hélice aéronautique sont en fait un exemple de choix de transfert de méthode, de savoir et d'expérience d'un domaine de la technologie à un autre. Ce transfert était en effet rendu possible — et cela malgré une certaine différence dans les détails — par la similitude des principes de base des domaines aéronautique et naval. Durand et Lesley eurent pour première tâche le dessin et la construction d'une soufflerie, autre domaine où l'Europe était nettement en avance sur les Etats-Unis. Après de nombreuses recherches, Durand s'est rangé au modèle d'Eiffel. La soufflerie et tous les instruments nécessaires aux expériences furent réalisés en 1916-1917.

Pour comprendre les expériences menées à Stanford, il faut maîtriser la notion des variables paramétriques liée aux hélices. La performance d'une hélice est fonction de deux ensembles différents de paramètres : les conditions de fonctionnement et les propriétés géométriques. Ces ensembles concernaient directement la longueur de l'hélice, sa rapidité de rotation, sa géométrie, la vitesse d'écoulement de l'air... Durand utilisait dans ses travaux toutes les combinaisons quantitatives des éléments que nous venons de mentionner et arrivait ainsi à quarante-huit modèles d'hélices qui couvraient de manière représentative tout l'éventail du champ d'exploration du moment. Ces hélices étaient en bois et provenaient du fameux pin de la côte du Pacifique.

Pour atteindre une adéquation entre modèle réduit et hélice grandeur nature, Durand fait appel à la loi de la similitude appropriée. Cette loi découle de la combinaison de V , n et D dans le nombre sans dimension V/nD . Ce nombre, déjà employé par Eiffel, est une mesure sans dimension du mouvement en avant de l'hélice. Mais cette formule et surtout les idées qui en découlaient étaient peu connues, au début du travail de Durand et Lesley. La maturation de leurs connaissances au cours de ce travail donna un bon exemple des complexités de la diffusion et du développement des idées en technologie. Durand savait, pour sa part, que la loi de la similitude datait de l'époque de William Froude où elle trouvait son application dans la marine, mais de manière très limitée. Dans ses travaux antérieurs sur les hélices de bateaux, Durand présentait ses résultats comme des fonctions



d'une entité qu'il appelle « le sillage », mais en 1916, il ignorait encore que cette fonction était analogue à V/nD . Dans un premier temps, il refusa même cette équivalence pour ne la reconnaître et l'admettre finalement qu'en 1917, après avoir réétudié Eiffel. En même temps l'analyse des nombres sans dimension devenait monnaie courante parmi les ingénieurs. La diffusion de ces idées fut largement stimulée par une série d'articles publiés par Edgar Buckingham en 1914. La technologie va se développer en fonction des demandes de la recherche et du dessin.

Les tests rapportés par Durand étaient le commencement d'un programme de dix ans de recherche sur les hélices à Stanford. Comme cela arrive souvent dans la recherche, une chose conduit à une autre. Toute une dynamique s'installe : la croissance de la compréhension élargit le champ initial et la maîtrise de la technique augmente la confiance et permet d'aller plus loin.

A cette époque, les exigences en aéronautique demandaient de nouveaux paramètres et leurs analyses. Dans cette optique, Durand et Lesley se consacrèrent plus particulièrement, pendant les cinq années suivantes, au rapport des hélices avec les conditions de vol. Ils apprirent que les performances du point de vue du décollage sur une courte distance, de la rapidité du vol, de la possibilité d'atteindre une haute altitude... dépendent en grande partie non seulement de la géométrie de l'hélice mais aussi de son inclinaison. Ils entamèrent donc un programme de recherche sur les paramètres de l'inclinaison des hélices, et le résultat de leurs recherches leur permet alors de construire : *a.* une hélice ayant les propriétés suffisantes — si ce n'est maximales — pour chaque manœuvre aérienne souhaitée ; et *b.* plus tard une hélice d'inclinaison variable.

L'étude était complète et les expériences avaient indiqué à Durand dans quelle direction continuer ses recherches. On peut trouver un résumé de ses idées dans une conférence qu'il a donnée à Londres devant deux mille auditeurs le 25 juin 1918 à l'occasion de la sixième réunion de la Royal Aeronautical Society. Au cours de cette conférence, il propose trois méthodes permettant d'obtenir des données sur les hélices : 1. les calculs théoriques suivant la méthode de Drzewiecki, 2. les expériences de soufflerie sur des modèles réduits, associées à la loi de la similitude qui permet le transfert des résultats aux hélices grandeur nature, 3. les expériences sur les hélices au cours du vol. Mais cette dernière méthode lui paraît trop onéreuse en temps et en argent. De plus, il est très sceptique quant à la première méthode car, pour lui, les théories s'appuient sur de nombreuses suppositions qu'il reste à confirmer expérimentalement. Finalement, ce sont à son avis les expériences sur les variations paramétriques des modèles réduits dans une soufflerie qui lui semblent les plus intéressantes. Mais sa préférence pour la deuxième méthode ne l'empêche pas de comprendre la nécessité de l'intégrer aux deux autres approches.

« Il semble probable que la corrélation finale entre le problème de calcul et les tout derniers résultats d'un projet aura lieu en deux phases. La première comprend une étude soignée des résultats des méthodes 1 et 2. Les corrélations qui en dérivent nous permettront pro-

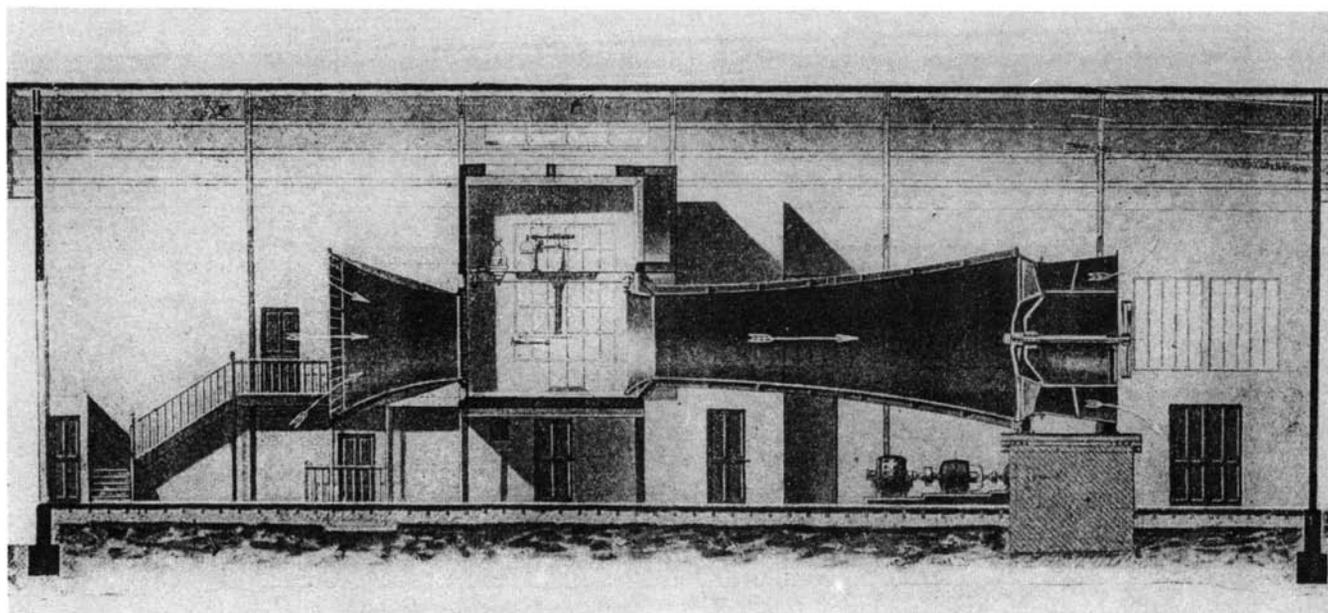
bablement de comparer les résultats théoriques et les résultats expérimentaux.

« ... La deuxième phase consiste en une série d'opérations de type expérimental ayant pour but de développer un schéma correcteur, permettant une bonne application des modèles réduits aux conditions de vol grandeur nature... Bien entendu, cela ne nécessite pas des expériences systématiques sur des modèles grandeur nature... Il semble raisonnable... qu'un échantillon d'expériences judicieusement choisies serait suffisant pour obtenir la corrélation désirée. »

Cette méthodologie, de plus en plus répandue dans l'aéronautique, allait au-delà des techniques du génie naval. Durand et Lesley tentèrent de 1922 à 1926 de mettre leur programme en application.

Dans un rapport publié en 1924, ils commencent par étudier la corrélation entre la théorie et les expériences sur des modèles réduits. Selon la théorie de Drzewiecki, les caractéristiques aérodynamiques des différentes sections de l'hélice sont évaluées séparément et la performance globale est calculée en faisant la moyenne des données. Toute la difficulté réside dans le calcul de l'écoulement secondaire induit par le mouvement de l'hélice. Nous avons ici le cas d'une méthode de variation paramétrique dépendant d'expressions théoriques plutôt que de manipulations expérimentales ; en effet, la notion de variations paramétriques n'exige nullement qu'elles s'appuient sur une démarche expérimentale. Cette approche conduit à la formulation de graphiques exprimant la fonction F , analogues aux résultats du système expérimental V/nD . Les deux approches fournissent des renseignements relativement comparables. Il y avait néanmoins des différences quantitatives non négligeables qui rendaient impossible une analyse précise des phénomènes. Ainsi, malgré les mérites de leur approche, Lesley et Durand ont les plus grandes difficultés à trouver un procédé valable leur permettant « de passer directement de la théorie à l'expérimentation ».

Une fois les comparaisons théoriques terminées, Durand et Lesley firent des expériences sur la corrélation entre modèles réduits et modèles grandeur nature. Pour obtenir les mesures qu'il recherche, Lesley passe l'été 1924 au nouveau laboratoire de la N.A.C.A., à Langley Field en Virginie, à faire des expériences sur cinq hélices de type Navy sur un biplan VE-7. Si les essais initiaux sur les hélices dans une soufflerie ne tenaient pas compte des problèmes aérodynamiques du moteur et de la cellule, cela n'était évidemment pas possible dans le cas d'un vol véritable. Par conséquent, dans une nouvelle série d'expériences en soufflerie menées à Stanford, Durand cherche à mieux simuler les conditions de vol en perturbant l'écoulement secondaire à l'aide d'obstacles tels que moteur et cellule. Ces expériences, relatées dans un rapport publié en 1925, montrent un écart de 6 à 10 % entre les résultats en soufflerie et en vol véritable. Durand et Lesley attribuent ces différences à une combinaison d'incertitudes expérimentales et à l'interaction de la taille de l'hélice et des effets secondaires de viscosité et de compressibilité. Malgré l'important potentiel de cette orientation, le résultat était moins concluant qu'ils ne l'espéraient.



Coupe du laboratoire de G. Eiffel à Auteuil en 1920.

Comme Durand et la N.A.C.A. l'avaient voulu, le programme de recherche à Stanford eut pour résultat une foison de renseignements sur les hélices. Cependant, ce travail n'eut qu'une influence partielle sur le dessin des hélices. Les hélices en bois de 1920-1925 ne paraissaient pas très différentes de celles des années 1914-1915, et la performance maximale des meilleurs modèles de Durand et Lesley n'était guère mieux que celle de leurs prédécesseurs. Les hélices en métal elles-mêmes, mises au point par la suite, n'étaient guère plus efficaces. Il devint rapidement évident que le potentiel maximum avait été atteint dès le début et qu'il paraissait difficile de l'améliorer. La véritable signification des travaux de Durand et Lesley réside dans l'aide qu'ils ont fournie aux dessinateurs d'avions, aide leur permettant de mieux intégrer l'hélice aux autres éléments de l'avion. L'emploi des variables paramétriques et d'un système de recherche liant expérimentation et conditions de fonctionnement opérationnel étaient à la base des améliorations. Dès lors, le dessinateur disposait des outils essentiels au dessin des véhicules aéronautiques.

Le travail conduit à Stanford eut d'autres effets moins directs. Il était devenu évident que, à cause des lacunes de la théorie, et des difficultés d'obtenir une bonne corrélation entre modèles réduits et conditions véritables de vol, les données sur les hélices ne pourraient provenir ultérieurement que d'expériences sur des avions grandeur nature. Ce qui conduisit la N.A.C.A. à construire en 1925-1927 la première soufflerie capable de faire des expériences sur des véhicules grandeur nature, le Propeller Research Tunnel de Langley Field, projet à la réalisation duquel Stanford participa pleine-

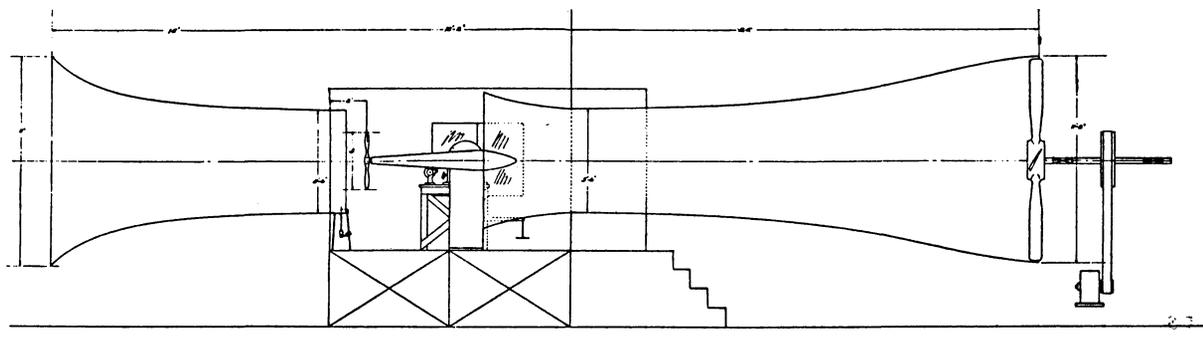
ment. C'est dans cette soufflerie que bon nombre d'avions des années 30 et 40 furent testés et perfectionnés.

VARIATIONS PARAMÉTRIQUES, MODÈLES RÉDUITS ET MÉTHODOLOGIE TECHNOLOGIQUE.

Les travaux de Lesley et Durand sont révélateurs quant à la méthodologie de la recherche en technologie. Dans leurs recherches sur l'hélice, ils se comportaient en technologistes. Mais comment ont-ils travaillé? Quels fut leur mode de raisonnement, et peut-on prétendre que leur démarche fut spécifiquement technologique⁶?

On essaiera de poser les jalons d'une première réponse dans les dix points suivants :

1. Les opérations de variation paramétrique peuvent être soit expérimentales, soit théoriques, et peuvent avoir deux finalités : *a.* offrir un nombre important de données systématiques de dessin, et *b.* aider au développement du modèle théorique. Le travail de Durand et Lesley donne quatre combinaisons possibles de moyens et de finalités. La variation paramétrique associée aux expériences fournit à la fois des données pour le dessin et une correction empirique pour l'amélioration d'une théorie. Pour leur part, les variations paramétriques de type théorique ont fourni la deuxième composante de ce processus. En cas de succès, la variation paramétrique théorique pouvait alors être utilisée à la mise au point du dessin.



La première soufflerie de Stanford. L'air circulait de gauche à droite. Annual report N.A.C.A. 1917, planche IV.

2. La variation paramétrique *expérimentale* n'est pas particulière à la technologie ; on la trouve également dans des activités nettement scientifiques. On peut citer, pour exemple, la fameuse expérience de Hans Geiger et d'Ernest Marsden en 1913 sur la diffusion du faisceau de particules (des atomes d'hélium doublement ionisés) suscitée par des collisions avec les noyaux d'atome. Ces chercheurs ont modifié systématiquement l'angle de déflexion donnant le nombre de particules diffusées, l'épaisseur de la feuille de métal qui fournissait la cible, son poids atomique, ainsi que la vitesse des particules incidentes ; tout cela constituait les paramètres du problème. Le but était « de tester le modèle atomique de Rutherford, selon lequel il existe au centre de l'atome une région dense ayant une forte charge électrique.

3. Comme nous venons de le voir, l'expérimentation scientifique et le technologiste utilisent la méthode des variations paramétriques de manière différente. Même si son travail le conduit finalement à fournir des données à la technologie, le scientifique n'éprouve qu'un intérêt tout à fait secondaire pour la production de données portant sur le dessin. Il utilise la plupart du temps la variation paramétrique pour établir une théorie ou un modèle. Pour leur part, les technologistes utilisent aussi les variations paramétriques pour développer et exploiter les théories, mais leurs objectifs sont différents de ceux des scientifiques. Leur engouement pour la théorie est surtout pratique, et inclue notamment l'amélioration des dessins. En somme, l'attitude des uns et des autres et leur utilisation des variables paramétriques montrent bien les différences profondes entre scientifiques et technologistes. Les premiers cherchent à « compren-

dre » les structures profondes des phénomènes, les seconds essaient de « faire » à partir de la matière existante.

4. Si, comme nous venons de le voir, la méthode des variations paramétriques n'est pas particulière à la technologie, la façon dont elle est utilisée est néanmoins bien distincte. En technologie, cette approche est essentiellement utilisée pour remédier à l'absence ou à l'imperfection de la théorie. Ce fait est peut-être le plus important en ce qui concerne le rôle de la variation paramétrique en technologie.

5. Les difficultés associées au développement et à l'application des dessins nécessitent un système de travail simultanément structuré et globalisant, que l'on ne trouve que dans la méthode des variations paramétriques.

6. On peut attribuer à plusieurs causes l'absence de théorie applicable à la technologie ; cette absence peut provenir simplement d'un manque de connaissances scientifiques, ou encore d'une inadéquation entre théorie et phénoménologie. En l'absence de théorie adéquate, il est difficile de savoir s'il convient mieux d'en créer une, ou bien de développer la dimension expérimentale. L'approche théorique, plus problématique et plus longue, a l'avantage d'apporter une compréhension globale et une méthode économique de dessin applicable à tout un ensemble de situations. L'approche expérimentale, en revanche, fournit des données de dessin relativement rapides, n'est pas comme la théorie soumise à des suppositions et à des simplifications et peut de ce fait mettre en lumière de nouvelles perspectives ; mais elle est économiquement

plus coûteuse et, bien entendu, limitée à une approche associée au système des nombres sans dimension. Même lorsqu'il y a une théorie adéquate, la variation paramétrique expérimentale reste nécessaire pour fournir des données numériques indispensables à l'application de la théorie aux cas concrets.

7. L'application des variations paramétriques nécessite une relation de fonction, comme dans une équation; cela suppose en retour que l'on connaît la mesure de performance ainsi que les paramètres sur lesquels elle s'appuie. La variation paramétrique constitue donc la deuxième étape du processus de recherche. La première phase — l'identification des quantités déterminantes — relève du bricolage qui dépend de l'intuition et du hasard.

8. La variation paramétrique expérimentale n'exige pas absolument l'emploi de modèles réduits, mais peut se faire en présence de dimensions grandeur nature. Cependant, pour des raisons de simplicité et d'économie, on se sert souvent de modèles réduits. En principe, les tests sur des modèles réduits n'exigent pas la méthode de variation paramétrique; mais on fait quand même appel à cette méthode lorsqu'il s'agit d'obtenir des données pour le dessin. Bref, la variation paramétrique peut se passer de modèle réduit, mais il n'y a pas de modèle réduit sans variation paramétrique.

9. L'utilisation de modèles réduits *dynamiques* est particulière à la technologie. Les scientifiques ont rarement, si ce n'est jamais, la possibilité de construire un modèle dynamique de leur objet de recherche. Ces derniers s'intéressent en effet plus particulièrement aux phénomènes naturels qui se déroulent à l'échelle de la nature. Les technologistes, au contraire, cherchent à construire des objets qui n'existent pas dans la nature, et sont libres de le faire à l'échelle qui leur convient; et parce qu'il est plus pratique de travailler en miniature, ils construisent des modèles réduits. Si les modèles réduits dynamiques sont particuliers à la technologie, il en va de même des lois de la similitude qui transfèrent ces modèles réduits à des situations grandeur nature. Les lois de la similitude sont absolument nécessaires au travail de l'ingénieur, tandis que les scientifiques les emploient à d'autres fins.

10. L'optimisation étant souvent employée en technologie, on serait tenté de penser qu'elle lui est particulière. Mais les scientifiques eux-mêmes l'utilisent dans la construction de leurs instruments, moins souvent cependant que les technologistes. Les technologistes doivent en principe dessiner et construire des produits de manière aussi efficace que possible, et sous des contraintes économiques et sociales que les scientifiques ne connaissent guère. En somme, l'optimisation est un élément constant, implicite ou explicite, de la pensée technologiste. Elle est pour le technologiste un ethos, c'est-à-dire un style de vie, alors qu'elle ne joue dans la vie du scientifique qu'un rôle occasionnel. Cette différence entre science et technologie est fondamentale, même s'il s'agit plus d'attitude que de méthode.

CONCLUSION.

Vu de l'extérieur, le travail de Durand et de Lesley pourrait ne paraître qu'un simple recueil de données d'un niveau élevé pour l'époque. Pourtant, une observation minutieuse révèle une méthodologie complexe, s'appuyant sur la variation paramétrique expérimentale et théorique, les modèles réduits et les lois de la similitude et les comparaisons entre théorie et expérimentation, et entre modèles réduits et modèles grandeur nature. Ces deux éléments se pénétraient intimement, et étaient conditionnés par les exigences du dessinateur. Mais si les travaux de Durand et de Lesley dépassent les simples données empiriques, cela ne signifie pas pour autant qu'ils faisaient de la recherche appliquée. Seuls quelques éléments de leur méthodologie se retrouvent dans l'activité scientifique⁷.

L'utilité technologique de cette méthodologie s'appuie d'abord sur le fait que, comme nous l'avons montré, il n'y a pas de relation essentielle entre variation paramétrique expérimentale et théorie. En effet, l'intérêt de la variation paramétrique expérimentale est justement qu'elle est capable de fournir des résultats satisfaisants en l'absence de théorie quantitative. Bien entendu, les ingénieurs peuvent utiliser une théorie lorsqu'ils le jugent désirable, mais cela relève de leur choix et non d'une nécessité. Utilisée en liaison avec les modèles réduits, la variation paramétrique expérimentale ne s'appuie sur la théorie que dans la mesure où elle peut utiliser l'analyse des lois de la similitude pour transférer les résultats expérimentaux des modèles réduits aux modèles grandeur nature. Cette façon de procéder est beaucoup plus facile que d'extraire de considérations physiques plus générales une théorie qui permette de prédire la performance *ab initio*.

Dans la mesure où l'absence de théorie adéquate est due à un manque de compréhension scientifique, la variation paramétrique fournit un moyen de pallier à ces lacunes. D'un certain point de vue, la méthodologie que nous venons d'étudier ici peut être perçue comme une évolution dans la technologie favorisant le développement du potentiel analytique nécessaire au dessin. Les ingénieurs des bureaux d'étude doivent être capables d'analyser leurs dessins, et les ingénieurs de recherche doivent pouvoir leur fournir les instruments dont ils ont besoin. Tous les travaux de Durand et de Lesley montrent comment les technologistes développent un champ de savoir pour résoudre des problèmes pratiques. Ce développement — de type technologique — est très différent de ce que l'on appelle généralement « le développement » qui signifie plutôt la mise au point d'un mécanisme ou d'un produit⁸. La méthodologie de variation paramétrique et d'emploi de modèles est en fait souvent perçue comme la méthodologie par excellence de l'évolution technologique. Il ne faut pourtant pas en conclure que cette méthodologie ne produit jamais des ruptures révolutionnaires.

Quoi qu'il en soit, la variation paramétrique offre un procédé systématique grâce auquel les technologistes peuvent analyser efficacement des problèmes parfois très complexes avec un minimum d'effort. Ainsi, ce système permet une certaine routine et facilite la forma-



DC 3 Douglas 1935.

tion de jeunes technologues ; la notion de génie cède devant la notion de compétence⁹.

Quelques questions enfin pour conclure. Mes travaux sur Durand et Lesley et sur le Britannia Bridge m'incitent à poser la question suivante : existe-t-il des modes de raisonnement particuliers au travail des ingénieurs ? Les techniques associées au dessin pourraient faire partie de ces modes. En outre, ne faut-il pas mettre l'accent sur la spécificité des méthodes utilisées par l'ingénieur plutôt que sur son savoir, pour la bonne raison qu'il y a moins de catégories de méthodes que de connaissances ? A noter que les méthodes étudiées ici proviennent toutes du domaine de la mécanique. La question s'impose, naturellement, de savoir si les méthodes appliquées en mécanique sont généralisables. Il est d'ailleurs probable qu'il existe d'autres méthodes en mécanique et dans d'autres domaines. Les réponses aux questions de ce genre seront nécessaires si l'on veut savoir s'il y a des modes de raisonnement particuliers au travail de l'ingénieur. Quelles qu'elles soient, ces réponses nous permettront d'approfondir notre compréhension de la démarche technologique.

Notes.

1. Pour avoir des exemples fournis par des philosophes, voir F. Rapp, «Technology and Natural Science - A Methodological investigation», *Contributions to a philosophy of Technology*, (Boston, 1974), p. 93-114 ; et

H. Skolimowski, «The Structure of thinking in Technology», *ibid.*, p. 72-85, et dans *Technology and Culture* 7 (1966), p. 371-383.

2. N. Reingold et A. Molella, rédacteurs, «The Interaction of Science and Technology in the Industrial Age - Proceedings of the Burndy Library Conference, 23-24 mars 1973», *Technology and Culture* 17 (1976), p. 621-742.

3. E.T. Layton, Jr, «American Ideologies of Science and Engineering», *Technology and Culture* 17 (1976), p. 688-701 ; voir également Nathan Rosenberg, «Technological Change in the Machine Tool Industry, 1840-1910», *Journal of Economic History* 23 (1963), p. 414-446.

4. N. Rosenberg et W.G. Vincenti, *The Britannia Bridge: The Generation and Diffusion of Technological Knowledge* (Cambridge, Mass., 1978), pp. 14-23-29.

5. G. Eiffel, *Nouvelles Recherches sur la Résistance de l'air et l'aviation*, texte et atlas (Paris, 1914) texte p. 353.

6. R.E. Mc Ginn, «What is Technology», *Research in Philosophy and Technology* (Greenwich, Conn., 1978), 1, p. 79-97.

7. A.E. Musson et E. Robinson, *Science and Technology in the Industrial Revolution* (Manchester, 1969), p. 73.

8. T.P. Hugues, «The Development Phase of the Technological Change», *Technology and Culture* 17 (1976), p. 423-481.

9. Usher, «Technological Change», p. 43-44, 49-50.