

Note de lecture par Pierre Vérillon

Vincenti, W. G. (1990). What engineers know and how they know it. Baltimore: Johns Hopkins.

Quel est le savoir des ingénieurs ? Comment se constitue-t-il ? Sous quelles formes existe-t-il ? Telles sont les questions que cet ouvrage cherche à documenter. L'auteur, qui a exercé comme ingénieur dans la recherche aéronautique US, conduit un travail d'enquête historique et épistémologique à partir de l'analyse de cinq problèmes qui se sont posés aux concepteurs et constructeurs américains dans la première moitié du XX^e siècle, alors que dominait la propulsion à hélice.

Ce livre se situe dans le sillage du travail d'E. Constant¹ qui a également abordé les problèmes d'épistémologie des techniques à travers une analyse socio-historique de l'industrie aéronautique. Vincenti et Constant se situent tous deux dans la tradition de la SHOT² et défendent la thèse d'une hétérogénéité fondamentale des modalités d'engagement et de fonctionnement cognitif (au sens large) dans les domaines respectifs de la science et de la technique. Vincenti considère que science et technique (*technology*) constituent deux sphères de connaissance séparées et refuse la conception, à ses yeux simpliste et peu conforme à la réalité, du génie (*engineering*) comme science appliquée. Il faut donc réinterroger plus largement les relations science/technique. Notamment, si l'évolution des savoirs techniques est conçue comme relativement indépendante de l'existence de savoirs scientifiques, il faut rendre compte de cette évolution par d'autres modèles. L'idée d'une autonomie de la sphère technique permet de légitimer que celle-ci soit étudiée pour elle-même en tant qu'objet d'une histoire et d'une sociologie des idées et de la connaissance.

Vincenti va limiter son étude aux activités d'ingénierie de conception mais il indique que pour être complète, une épistémologie du génie devrait inclure les domaines de la fabrication et de la mise en oeuvre (*operation*). En outre, il ne s'intéresse qu'aux activités de conception « normale » (Constant, Kuhn³), celles qui, par opposition aux situations de conception « radicale », n'introduisent pas de ruptures techniques notables dans une lignée d'artefacts. Enfin, Vincenti s'intéresse à un niveau de conception dans l'entreprise où le contexte (*ambiance* au sens de Staudenmaier⁴) joue peu : les grandes options (taille de l'avion, performances, ...) sensibles aux contraintes socio-économiques ont déjà été définies par la direction. Les savoirs mobilisés et/ou générés (savoir factuel, savoir-faire, savoir produire de nouveaux savoirs) concernent ici le niveau où sont conçus les différents composants de l'avion (ailes, train d'atterrissage, moteurs, etc.), c'est-à-dire un niveau d'ingénierie de base peu soumis aux influences extérieures à la sphère de conception.

L'ouvrage est composé de huit chapitres :

- 1– Introduction : le génie considéré en tant que savoir ;
- 2– Conception et genèse du savoir : l'aile Davis et le problème de la conception des voilures d'avion, 1908–1945 ;
- 3– l'élaboration de normes pour la conception : les spécifications relatives à la maniabilité en vol des avions US, 1918–1943 ...
- 4– Un outil théorique pour la conception: l'analyse en terme de volume de contrôle, 1912–1953 ;
- 5– Des données pour la conception : les essais d'hélices de W.F. Durand et E.P. Lesley, 1916–

1. Constant, E.W. (1980). *The origins of the turbojet revolution*. Baltimore: John Hopkins University Press.

2. Cf. Staudenmaier, J.M. (1985). *Technology's Storytellers*. Cambridge, Massachusets: MIT Press.

3. Kuhn, T.S. (1962). *The structure of scientific revolution*. Chicago: Chicago University Press.

4. Op. Cit.

1926 ;

6– Conception et fabrication : l’innovation du rivetage à tête noyée dans la construction d’avions US, 1930–1950 ;

7– La structure du savoir de conception en ingénierie ;

8– Une modélisation de la genèse du savoir d’ingénieur en termes de variation–sélection.

De nombreuses notes, notamment bibliographiques, ainsi qu’un index des noms propres et des concepts, complètent l’ouvrage.

La première étude (chap. 2) concerne le problème de la conception de la géométrie des ailes d’avion au seuil de la seconde guerre mondiale. A cette époque, l’absence de moyens de calcul puissants et le faible développement théorique en dynamique des fluides (notamment des écoulements visqueux) faisaient de la conception des voilures une pratique essentiellement empirique: amélioration par essai et erreur de modèles ayant fait leurs preuves ou sélection dans des catalogues de voilures standardisées publiés par une agence gouvernementale (la NACA, ancêtre de la NASA) à partir de tests comparatifs réalisés en soufflerie. L’auteur raconte comment, dans ce contexte, l’aile - hors norme mais aux propriétés aérodynamiques inhabituellement efficaces - du bombardier B-24, fut conçue par un ingénieur « free lance » à partir de calculs fantaisistes. Cependant l’intérêt de ce chapitre réside davantage dans l’analyse qui est faite du travail de conception lorsqu’il est effectué en l’absence d’un modèle ou de lois permettant de rendre compte du comportement d’un artefact et donc de le prévoir (situation que Staudenmaier⁵ caractérise comme étant à « données problématiques »).

La seconde étude (chap. 3) relate comment les concepteurs furent conduits à s’intéresser à, puis à prendre en compte, puis enfin à spécifier techniquement, les préoccupations et les attentes des pilotes relatives au comportement des avions dans les différentes phases de vol. Le problème a été celui d’identifier et de traduire des données essentiellement qualitatives (les impressions des pilotes) en descripteurs mécaniques quantifiables, permettant à la fois de définir des normes de comportement et de trouver des solutions techniques pour les satisfaire. L’étude aborde également l’émergence du pilote d’essai professionnel et analyse les modalités de coopération pilote d’essai-ingénieur de conception.

Dans la troisième étude (chap. 4), Vincenti s’intéresse à une méthodologie utilisée en mécanique des fluides et en thermodynamique pour l’analyse quantitative locale de phénomènes de flux. Cette méthode d’analyse consiste à fixer une frontière au phénomène étudié - la surface ou le volume de contrôle (*control surface, control volume*) - et de ne s’intéresser, au niveau mécanique, qu’aux conditions à cette limite : entrées, sorties, interactions. L’avantage réside en ce que les calculs relatifs aux différentes grandeurs physiques observées à la frontière du système étudié sont plus « maniables » que ceux qu’implique l’étude détaillée des phénomènes internes et, pour les besoins des ingénieurs, souvent suffisants. L’auteur retrace l’histoire de cette méthode largement utilisée par les ingénieurs en aéronautique mais élaborée à l’origine - puis progressivement abandonnée - par des physiciens. Ceux-ci se préoccupent de la compréhension fine des phénomènes qui passe nécessairement par l’élaboration et la résolution (très coûteuse avant l’ère informatique) des équations différentielles de flux étudié. En revanche, pour les ingénieurs, motivés par l’optimisation d’un artefact ou d’un process, souvent sous contrainte de temps et de budget, des résultats globaux et approximatifs peuvent suffire. Pour Vincenti, cette méthode est aussi un outil pour penser : pour les ingénieurs, c’est un organisateur du savoir pour la conception dans les situations à flux fluides et/ou thermiques, valable pour une classe étendue de situations et d’artefacts (il s’agit d’une sorte de concept pragmatique au sens de Pastré). Notamment, il a une fonction « check list » permettant de s’assurer que l’on a bien tenu compte de l’ensemble des variables et paramètres intervenant dans la situation. Cette méthode est pour l’auteur exemplaire de la « science pour les ingénieurs » (*engineering science*). Celle-ci a toutes les caractéristiques d’une science de la nature, si ce n’est qu’elle est entièrement orientée par le projet de concevoir des artefacts. Son critère ultime est donc l’efficacité, ce qui détermine à la fois

5. Op. Cit.

les limites et les formes de cette science.

La quatrième étude (chap. 5) renvoie à la nécessité pour le concepteur de disposer de données quantitatives concernant le comportement de tel ou tel artefact. Souvent ces données peuvent être calculées à partir d'un modèle théorique, mais en l'absence d'un tel modèle, seule une démarche expérimentale permet de les constituer. A propos de la conception d'hélices, l'auteur va s'intéresser à l'utilisation historique d'une telle méthode : la variation paramétrique (*parametric variation*). Comme son nom l'indique, il s'agit d'étudier quantitativement le comportement ou les performances d'un artefact en faisant varier systématiquement les paramètres qui le définissent. Souvent, on est conduit à travailler à partir de modèles réduits de l'artefact et se posent alors des problèmes d'échelle. Vincenti retrace les travaux de Durand et Lesley à la NACA destinés à déterminer les caractéristiques géométriques d'hélices pour l'industrie : l'élaboration des paramètres pertinents (qui constitue en soi un problème important), la fabrication et l'essai en soufflerie des hélices expérimentales, la nécessité de prendre en compte l'interaction entre l'hélice propulsive et la structure propulsée, les calculs de similitude (nécessités par les biais d'échelle), la présentation des résultats en fonction des besoins de conception, l'effet en retour sur la théorisation. L'auteur remarque que ces méthodes expérimentales servent d'argument pour affirmer le caractère scientifique des génies, alors qu'en réalité, elles constituent un palliatif en l'absence de données scientifiques.

Dans la dernière étude (chap. 6), Vincenti analyse l'histoire de l'élaboration parallèle et contemporaine, par différents constructeurs d'avions américains, de modes de rivetage non protrusif. Dans les années 1930, les principaux obstacles à l'aérodynamisme étant surmontés, les phénomènes de traînée, liés à l'assemblage traditionnel par rivets à tête ronde, commencent à être considérés comme indésirables. Contrairement aux évolutions étudiées précédemment dans l'ouvrage, les problèmes posés et les contraintes soulevées proviennent de la sphère de la fabrication : comment assembler de manière fiable des feuilles métalliques par des rivets non protrusifs (à têtes plates), donc, par conséquent, noyés dans l'assemblage ? L'usinage du logement conique des têtes de rivet s'avéra peu satisfaisant étant donnée la minceur des feuilles et on s'orienta vers divers procédés par emboutissage-perçage et emboutissage poinçonnage des logements. De nombreux problèmes d'ordre géométrique (angle de conicité des têtes), mécanique (fissuration des tôles à l'emboutissage) et techniques (outillage) surgirent et trouvèrent, selon les entreprises, des solutions diverses, essentiellement après de nombreux essais et tests. Ces solutions coexistèrent un certain temps jusqu'à ce que l'état, principal client pour la production militaire impose une géométrie standard des rivets (tête conique à 100°). Les industriels, en liaison avec les agences gouvernementales, poursuivirent la standardisation et la normalisation au point que le rivetage non protrusif acquit vers 1950 le statut de routine. Dans cet exemple, les connaissances d'origine scientifique n'interviennent pas : le principe est simple et chaque compagnie trouva parmi ses ingénieurs de production et ses ouvriers les connaissances pour résoudre les problèmes posés. Elles sont de trois types : les connaissances relatives au rivetage, les connaissances liées aux contraintes locales de fabrication (formes et caractéristiques des assemblages, accessibilité...), les connaissances relatives aux matériaux.

Les deux derniers chapitres constituent une discussion théorique des cas présentés. Pour Vincenti, l'évolution dans la sphère technique procède par identification et solution de problèmes techniques puis par sélection entre solutions concurrentes. Les solutions retenues peuvent être analysées au niveau des dispositifs techniques (avion, générateur électrique, machine-outil...) et/ou au niveau des systèmes techniques (compagnie d'aviation, réseau électrique, usine...). L'étude d'un dispositif relativement stabilisé, l'avion, montre qu'une fois cette solution retenue, des problèmes continuent d'émerger qui constituent l'essentiel du travail normal de l'ingénieur.

Il cite Laudan⁶ qui considère cinq sources d'évolution cognitive (*cognitive change*) dans la sphère technique :

– les problèmes posés par le milieu et non encore résolus,

6. Laudan, R. (Ed.) (1984). *The nature of technological knowledge: are models of scientific change relevant?* Dordrecht: Reidel.

- l'échec fonctionnel d'une technique existante,
- l'extrapolation d'une réussite technique existante,
- des contradictions entre techniques existantes,
- l'anticipation d'échecs potentiels de techniques existantes.

La communauté sélectionne certains problèmes comme étant prioritaires soit sous pression écono-mico-sociale du milieu soit pour des raisons intra-techniques. La sélection d'un problème est d'autant plus probable que sa solution constitue un enjeu pour un dispositif ou système considéré et que des voies de résolution sont entrevues. Parfois des directions de résolution sont pressenties avant que des solutions plausibles n'apparaissent. C'est notamment le cas, selon Constant, lorsqu'existe une « pré-somption d'anomalie » (*presumptive anomaly*) : sans qu'il y ait défaillance du dispositif ou système existant (la propulsion à hélice, p. ex.), des considérations scientifiques permettent de penser, soit que, dans des conditions ultérieures, ce système connaîtra des limites, soit qu'un système radicalement différent pourra le remplacer avantageusement.

Vincenti signale d'autres sources de problèmes endogènes à une technique :

- la « logique interne d'une technique » : une fois sélectionnée, une nouvelle solution engendre dans son milieu tout un ensemble de problèmes inédits,
- les « besoins internes à la conception » : la conception ou la reconception d'artefacts suscite un état d'incertitude qui se traduit par un besoin de données, de méthodologies, de concepts nouveaux.

Vincenti distingue six catégories de savoir mobilisées dans les activités de conception :

1- Les unités conceptuelles de base pour la conception (*fundamental design concepts*).

En situation de conception « normale », le concepteur dispose d'un répertoire de connaissances de base relatif à l'artefact :

- a.- le principe opératoire : comment les composants constitutifs de l'artefact concourent fonctionnellement à la réalisation de sa finalité. Un principe opératoire définit une classe d'artefacts et la distingue d'une classe fonctionnant sur un autre principe (avions vs. hélicoptères, p. ex.). La connaissance des lois de la nature permet de rendre compte du principe opératoire et peut concourir à optimiser la conception d'un artefact mais elle n'engendre pas ce principe (qui n'apparaît que dans le cadre d'un projet pragmatique).
- b.- la configuration normale de l'artefact : il s'agit de la morphologie générale ou de l'arrangement structurel communément admis comme étant l'incarnation la meilleure du principe opératoire. L'association d'un principe opératoire et d'une configuration normale constitue la « technique normale » (*normal technology*) au sens de Constant. Le travail de (re)conception normal consiste à améliorer un dispositif existant ou à l'adapter à des conditions plus contraignantes ou inédites. Un travail de (re)conception « radical » aboutit soit à s'écarter de la configuration normale soit à changer de principe opératoire.

2- Les critères et spécifications.

A l'intérieur du cadre fixé par un principe et la configuration qui l'incarne, il faut encore élaborer les critères techniques qui définissent l'artefact (pour un avion, p. ex., vitesse, charge utile, plafond, autonomie...). Certains critères sont difficiles à définir (chapitre 3). L'attribution de valeurs dimensionnelles à ces variables relève de la conception. Parfois elles sont prescrites administrativement (recommandations, normes). Cet encadrement par des critères distingue selon Vincenti travail scientifique et génie. L'élaboration de critères dépend notamment des trois points suivants.

3.- Les outils théoriques.

a.- Les méthodes et théories mathématiques permettant l'expression sous forme d'équations, formules et autres formalismes mathématiques :

- des lois physiques (aboutissant à la théorisation d'artefacts : poutres, ailes d'avion, transistor...),
- des « lois phénoménologiques » (modèle que se construit l'ingénieur en l'absence de ressources de type scientifique : modélisation des turbulences, p.ex. Elles sont rarement rigoureuses mais donnent des résultats acceptables),
- des règles quantitatives admises (*quantitative assumptions*), reconnues comme grossières mais ne portant pas à conséquence (idée que dans un assemblage riveté, p. ex., la charge est répartie également sur tous les rivets).

b.- Les concepts intellectuels. Ces concepts sont d'une grande variété, ils vont du scientifique au pragmatique, du quantitatif au qualitatif, du mathématique au physique. Certains concernent seulement une classe d'artefact, d'autres sont plus généraux. Ils peuvent renvoyer à des notions scientifiques : force, masse, courant électrique, etc., ou techniques : rendement rétroaction, ... et sont souvent associés à des formalismes mathématiques (p. ex., la ligne de courbure moyenne du profil d'aile).

4.- Les données quantitatives.

a.- « descriptives » (les constantes physiques, la résistance des matériaux, ...). Lorsque la théorie ne permet pas de prévoir les conséquences de changements de valeur d'une variable, on constitue systématiquement des données paramétriques.

b.- « prescriptives » (normes, spécifications, ...). Il s'agit de dimensions à respecter, de limites à ne pas dépasser...

5.- Les considérations pratiques.

C'est le savoir que l'on ne trouve pas dans les manuels car souvent valable localement (p.ex., les contraintes de fabrication dans telle usine) ou peu explicite (cf., au chapitre 3, la notion de maniabilité de l'avion en vol qui a longtemps été de l'ordre de l'informulable. Par la suite, elle a pu devenir un « concept intellectuel » quantifiable et lié à une modélisation physique de la stabilité de l'avion).

6.- Les schèmes de conception (*design instrumentalities*).

a.- « procédures plus ou moins structures » : p. ex., l'analyse d'un artefact en ses composants (aile = plan + profil).

b.- « façons de penser » : ce sont des schèmes qui guident la représentation. Parfois ils sont associés à des « concepts intellectuels », comme le schème qui dissocie épaisseur et courbure de la voilure. Parfois le schème préexiste au concept, comme dans l'usage d'analogies.

c.- capacités de discernement et de décision : il s'agit de capacités intuitives qui se construisent essentiellement par expérience et qui renvoient à la dimension quasiment « artistique » de l'ingénierie. Elles distinguent souvent le grand designer du concepteur ordinaire.

Dans la réalité, ces six catégories interagissent entre elles et un savoir peut changer de catégorie. En outre, on peut à l'intérieur de ces catégories distinguer des niveaux et des emboîtements selon qu'on s'intéresse au niveau global du dispositif ou au niveau de ses sous-ensembles. Un nouveau savoir à l'origine d'un changement radical (p. ex., l'avènement des moteurs à réaction) n'entraîne pas nécessairement un changement radical des composants (ailes, fuselage, train d'atterrissage.) et donc des savoirs associés.

Dans le dernier chapitre, Vincenti présente un modèle de la genèse du savoir dans les génies. Celle-ci

résulterait d'un double processus de génération de variation aveugle (*blind variation*) et de rétention sélective. Variation aveugle signifie que celle-ci s'effectue non pas au hasard ou sans principe mais en absence relative de prévisibilité. Il cite en exemple les cinq prototypes très différents conçus par Blériot de 1906 à 1908 qui conduisirent à la sélection de ce qui devint la « configuration normale » : hélice en traction, monoplan, gouverne arrière.

Trois sortes d'activités mentales participent à la génération de variation en situation de conception :

- la remémoration de situations analogues afin d'activer les connaissances qui s'étaient avérées utiles. Les variations ayant échoué sont également évoquées mais écartées sauf si la situation en cours est suffisamment inédite,
- l'élaboration conceptuelle d'idées inédites suscitées par les circonstances nouvelles et qui présentent des chances de réussite. Au sens où ces idées diffèrent sensiblement de ce qui a réussi par le passé, elles sont dans une certaine mesure « aveugles » : toute variation ne reposant pas sur un savoir antérieur est nécessairement en partie aveugle,
- l'élimination en pensée – donc sans les soumettre à des essais – des variations les moins susceptibles de réussite.

Les mécanismes de variation évoluent au fur et à mesure que le savoir relatif à une technique (*technology*) s'accumule :

- les jugements a priori sont plus faciles,
- les connaissances accumulées stimulent d'abord la genèse de nouveauté, puis il y a saturation de la technique et, sauf apport radical permettant de la renouveler, il y a stase,
- de nouvelles méthodologies de sélection (cf. infra) issues de la théorie ou de l'expérimentation rejaillissent sur les mécanismes de variation.

La sélection ne résulte pas seulement de tests en vraie grandeur. Même si les situations d'usage réel restent une source décisive de connaissances, les essais sur modèles réduits, les simulations (soufflerie, CAO,...), la modélisation mathématique permettent de prévoir le comportement de l'artefact.

L'incertitude constitue une mesure de la connaissance relative à une technique. Avec la maturation de cette technique, elle diminue. La variation devient de moins en moins aveugle. Le processus de sélection devient plus assuré grâce à de meilleures techniques analytiques et à une meilleure instrumentation (mesures, capteurs, calculateurs...). Le coût de la sélection baisse également favorisant l'accroissement de variations « pour voir » - la « créativité » devient moins chère.

Dans une perspective de didactique des disciplines technologiques, le travail de Vincenti est intéressant dans la mesure où il cherche, par une approche « écologique » de la conception dans un secteur « de pointe », à illustrer et à théoriser l'opposition science / technique en ce qui concerne la nature des savoirs manipulés, leur genèse, leur manipulation et leur mise en oeuvre. Ce travail pourrait utilement être rapproché des positions de J. Perrin⁷. Il tente également d'articuler cette réflexion sur l'évolution cognitive dans la sphère technique avec le modèle de Kuhn, c'est-à-dire en termes de paradigmes et de « technologie normale » versus « technologie radicale ».

7. Perrin, J. (Ed.) (1991). *Construire une science des techniques*. Limonest: L'interdisciplinaire.