

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 103 (1977)
Heft: 24

Artikel: L'utilisation de propulseurs à eau surchauffée
Autor: Hool, André / Weibel, Jean-Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73271>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

L'utilisation de propulseurs à eau surchauffée

par ANDRÉ HOOL, Zurich, et JEAN-PIERRE WEIBEL, Vufflens-le-Château

Le moteur électrique, le moteur à explosion — Diesel ou Otto, à deux ou à quatre temps — et la turbine à gaz couvrent la plus grande partie des besoins en énergie mécanique. Ils sont particulièrement bien adaptés à un contrôle souple et précis de la puissance fournie ; certains d'entre eux sont même capables d'importantes surcharges momentanées sans dommage aucun. L'expérience acquise par une utilisation par millions d'exemplaires a permis de les porter à un haut niveau de fiabilité et c'est tout juste si l'on commence à ressentir le handicap majeur des moteurs thermiques : leur faible rendement énergétique.

Il reste toutefois un certain nombre d'applications où aucune de ces machines éprouvées ne répond aux exigences. Pensons notamment à la technique spatiale, où seules les fusées — à propellants liquides ou solides — peuvent être utilisées. C'est l'illustration la plus spectaculaire du cas où l'on a besoin d'une puissance très élevée pendant un temps très court. Les armes à feu représentent encore un exemple plus extrême, l'énergie se développant l'espace d'une fraction de seconde.

Plus près de notre vie quotidienne, il existe nombre de tâches pour lesquelles les sources d'énergie mécanique traditionnelle sont mal adaptées. Citons les innombrables cas d'expérimentation d'impacts : démonstration de la sécurité des automobiles ou de leurs accessoires, essais de glissières de sécurité d'autoroutes, etc. Dans le domaine aéronautique, on peut mentionner les essais de résistance au choc des pare-brise, les essais de sièges éjectables ou de fauteuils de passagers, de certains équipements. Dans tous ces cas, il convient d'atteindre une vitesse élevée, ce qui ne constitue en soi pas un problème ; en revanche, l'espace restreint disponible pour ces essais impose une accélération très élevée, donc une puissance considérable.

Pour illustrer ces exigences, on peut citer l'installation acquise par le Technicum de Biel pour effectuer des essais d'impact avec des automobiles : ces dernières sont accélérées par un treuil dont l'entraînement est assuré par une série de gros moteurs V-8 provenant de voitures usagées. La puissance installée est donc de plusieurs centaines de chevaux, utilisés à chaque essai quelques secondes seulement (pour ne rien dire de la complexité de l'installation).

Ces difficultés on conduit dans bien des cas à l'utilisation de fusées à poudre ou à propellent liquide en guise de propulseurs, qui répondent fort bien aux exigences techniques formulées plus haut, mais leur utilisation est restreinte par le prix spécifique extrêmement élevé de l'impulsion qu'elles fournissent. En outre, les modèles couramment utilisés ne permettent pas de moduler la poussée et conduisent dans bien des cas à un gaspillage d'énergie coûteux. Elles requièrent enfin de strictes mesures de sécurité.

Plutôt que de générer l'énergie sur place au moment où l'on en a besoin, on peut imaginer de la stocker, puis de la libérer à la demande. Cela permet évidemment de se contenter d'une puissance installée beaucoup plus faible, puisque le facteur temps ne joue pas un rôle important.

L'eau surchauffée offre une possibilité très commode d'emmagerer sous un volume relativement faible d'énormes quantités d'énergie facile à libérer : *un litre d'eau, porté à une température de 300°C dans un récipient fermé, contient sous forme thermique l'équivalent de l'énergie potentielle d'une tonne d'eau ayant une hauteur de chute de près de 100 mètres !* Cette énergie peut être utilisée par l'intermédiaire de la vapeur, que ce soit pour entraîner une turbine ou des pistons, ou en se servant de la réaction du flux obtenu en libérant dans l'atmosphère l'eau surchauffée. Dans ce dernier cas, on obtient un propulseur à eau surchauffée, appelé aussi fusée à eau surchauffée.

1. Principe du propulseur à eau surchauffée

L'eau contenue dans un récipient fermé est chauffée au-delà de la température d'évaporation en atmosphère libre. Sans possibilité d'expansion pour la vapeur, l'eau reste sous forme liquide et sa pression monte en fonction de la température (fig. 1) et accumule de l'énergie thermique (la part due à l'augmentation de pression est négligeable).

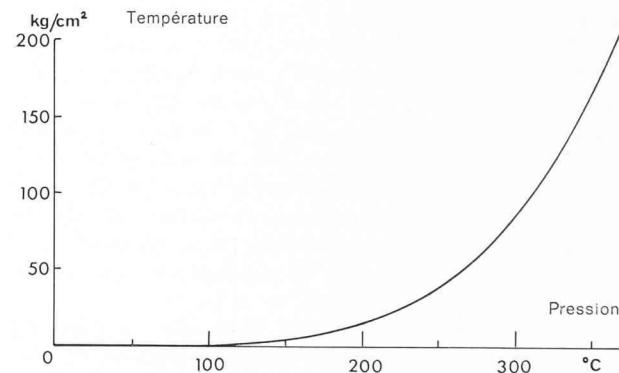


Fig. 1. — Relation entre la pression et la température de l'eau dans un récipient clos.

La détente adiabatique de l'eau la convertit en vapeur, dont l'écoulement vers l'extérieur crée la réaction souhaitée ; ce résultat est obtenu en ouvrant un orifice dans le récipient. L'adjonction de tuyères divergentes à l'orifice permet d'améliorer considérablement le rendement de la fusée ainsi obtenue (fig. 2).

Sur le plan pratique, plusieurs problèmes se posent :

- La pression atteinte à l'intérieur du propulseur s'élève à environ 60 kg/cm² dans la zone optimale d'utilisation. Si l'on ajoute que la température est alors d'environ 270°C, on imagine mieux à quel point est délicat le choix du matériel pour maintenir au minimum la tare du propulseur.
- L'intérêt de la formule résidant, comme nous le verrons par la suite, dans une utilisation répétée, la résistance à la corrosion joue un rôle important.
- Pour utiliser au mieux les caractéristiques fondamentales de ce type de propulseur, il convient de contrôler avec précision le temps d'ouverture de la ou des tuyères, ceci dans un liquide à 270°C.
- Il s'agit enfin de chauffer de façon pratique et économique une quantité d'eau donnée.

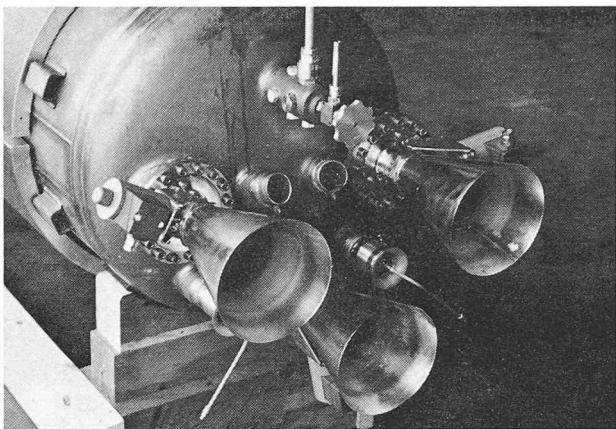


Fig. 2. — Exemple de tuyères divergentes.

L'énoncé de ces problèmes explique pourquoi le propulseur à eau surchauffée a longtemps été incapable de s'imposer dans la pratique, alors que son principe était connu depuis fort longtemps ; c'est en effet en 1824 déjà que James Perkins a breveté le principe de l'emmagasinage d'énergie par l'eau surchauffée.

Jusqu'à la mise au point des propulseurs décrits dans la suite de cet article, les applications n'ont été qu'épisodiques et n'ont pas connu de suite. C'est surtout en Allemagne qu'ont été expérimentés avec plus ou moins de succès des propulseurs à eau surchauffée.

2. Générateur thermique

Pour les applications les plus fréquentes, la quantité d'eau par récipient se situe entre 20 et 500 litres. Alors que la chauffer à 100°C ne présente pas trop de problèmes, il est difficile d'atteindre les 250 à 300°C requis, si l'on veut conserver très bas le prix spécifique de l'impulsion spécifique (impulsion = poussée fournie \times temps de poussée).¹

Comme il est souhaitable d'obtenir une répartition la plus uniforme possible de la température, il est intéressant d'intégrer le corps de chauffe au propulseur. Afin d'éviter des déperditions trop importantes ou la nécessité d'une isolation thermique lourde et coûteuse, il convient de limiter le temps de chauffage.

Si l'on choisit un chauffage électrique, la puissance nécessaire dès que l'on utilise plusieurs centaines de litres d'eau devient difficilement compatible avec les sections d'alimentation disponibles sur nos réseaux.

La solution choisie a consisté à incorporer une chambre de combustion pulsatoire au propulseur (fig. 3). Le carburant est injecté à basse pression dans la chambre de combustion, en même temps que de l'air comprimé ; un allumeur électrique déclenche la combustion, qui s'entretient ensuite elle-même, de sorte que l'allumage et l'apport d'air comprimé peuvent être coupés. En effet, immédiatement après la première combustion, les gaz brûlés s'échappent, créant un appel d'air frais dans la chambre de combustion. Le mélange ainsi créé avec le carburant injecté de façon continue s'enflamme au contact des résidus de gaz brûlés et par l'effet de l'onde de choc renvoyée dans les tuyaux d'échappement. Ce processus se répète avec une fréquence de l'ordre de grandeur de 100 Hz. Le fonctionnement de ce générateur

¹ Il s'agit là d'une définition grossière, mais parfaitement adaptée pour la comparaison avec les fusées à poudre, dont la poussée est pratiquement constante. De fait, l'impulsion I se définit comme l'intégrale de la poussée S par rapport au temps : $I = \int_0^t S(t)dt$. Pour les applications, il convient d'en soustraire l'impulsion absorbée par la tare et le combustible ou l'eau du propulseur pendant l'accélération.

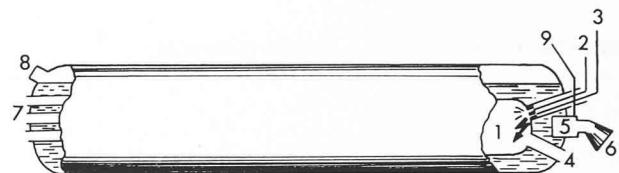


Fig. 3. — Schéma du générateur thermique.

thermique est analogue à celui des pulsoréacteurs montés sur les bombes volantes V-1 de la dernière guerre ; dans notre cas particulier, l'énergie du carburant n'est pas convertie en poussée, comme sur les V-1, mais en chaleur uniquement. De plus, aucune valve n'est nécessaire à la combustion pulsatoire, de sorte que *ce générateur thermique ne comporte aucune pièce mobile*. La température de combustion est très élevée.

Plongée directement dans l'eau, la chambre de combustion est soumise à une pression extérieure allant jusqu'à 60 kg/cm². Comme ses dimensions sont très faibles, la paroi reste mince. Etant placée dans le milieu qu'elle doit chauffer, elle permet un échange de chaleur direct et atteint une puissance de chauffage utile extrêmement élevée : *pour un volume d'environ 4,5 dm³, elle atteint 60 000 kcal/h, c'est-à-dire la puissance de la chaudière d'une grande villa !*

L'incorporation d'une chambre de combustion pulsatoire au propulseur à eau surchauffée a permis de franchir le pas qui séparait un engin expérimental d'un outil utilisé dans la routine quotidienne, indépendant de toute infrastructure.

3. Commande des tuyères

Le problème principal consistait à ouvrir à un moment très précis une soupape, cela contre une pression de 60 kg/cm². Pour les dimensions de tuyère adaptées aux applications prévues, la seule possibilité pratique résidait dans l'utilisation d'une servovalve différentielle, qui tire parti de la pression de l'eau (fig. 4). La vidange de la chambre dont la pression maintient la valve fermée est assurée par une électrovalve Atkomatic de mise à l'air libre.

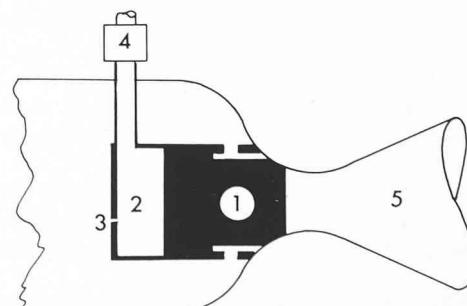


Fig. 4. — Schéma du dispositif d'ouverture des tuyères.

Après maints tâtonnements, notamment en ce qui concerne la forme des surfaces du piston et du col de la servovalve, on est arrivé à une précision d'ouverture et de fermeture permettant de maîtriser des programmes de poussée complexes.

La poussée maximale étant donnée par la section minimale de la tuyère, il s'est avéré adéquat de disposer de

plusieurs tuyères par propulseur, de façon à régler la poussée en fonction des besoins. La possibilité de disposer ainsi librement les tuyères sera également utilisée pour obtenir un freinage, ce qui accroît considérablement la gamme d'application du propulseur à eau surchauffée.

La commande électrique des soupapes permet d'exécuter des programmes de poussée complexes, exactement adaptés aux tâches à accomplir, comme on le verra dans les exemples d'applications pratiques.

4. Dimensionnement et choix du matériau de l'enveloppe

Alors que la forme sphérique est optimale pour un récipient sous pression, des considérations d'ordre pratique — facilité de fabrication, positionnement des tuyères — conduisent à choisir la forme cylindrique, les fonds correspondant à une forme standard à deux rayons de courbure.

En pratique, les dimensions sont choisies pour utiliser au mieux les grandeurs de tôle livrables, ainsi que les propriétés mécaniques, compte tenu des épaisseurs disponibles.

En effet, le corps du propulseur étant assemblé par soudage, il convient d'avoir un minimum de cordons de soudure. Dans le cas de petits propulseurs, il est possible d'obtenir le corps à partir de tubes du commerce.

Etant donné le champ d'application des propulseurs, il est important de réduire la tare à un minimum, ce qui conduit à utiliser des alliages à très haute résistance. La mise au point des propulseurs décrits plus loin s'est faite à un moment où commençaient à apparaître sur le marché des alliages soudables atteignant une résistance de 210 kg/mm², pour une limite d'élasticité de plus de 180 kg/mm². Autres caractéristiques séduisantes, il était possible de retrouver par traitement thermique après soudage les propriétés mécaniques originales et ce matériau pouvait être assemblé par soudage avec les alliages inox courants (18/8), ce qui évitait de devoir utiliser cet alliage extrêmement coûteux pour des éléments non structuraux. Enfin, à la température de service de 270°C, il présente encore une résistance d'environ 170 kg/mm².

Le choix primitif s'est porté sur un alliage dit « Maraging », c'est-à-dire durcissant à l'air après le traitement thermique (18-19 % Ni, 8,5-9,5 % Co, 4,6-5,2 % Mo, 0,5-0,8 % Ti, 0,05-0,15 % Al), présentant les caractéristiques sensationnelles mentionnées plus haut. De fait, ces dernières s'accompagnaient de propriétés extrêmement néfastes pour l'application prévue. Il a bien été possible de réaliser un récipient à haute pression, dimensionné pour 110 kg/cm² à la rupture, d'une épaisseur d'enveloppe de 1,2 mm seulement ! En revanche, l'allongement à la rupture, de 5 % sur catalogue, s'est révélé pratiquement nul, ce qui s'accompagne d'une sensibilité extrême à toute irrégularité de la surface, évidemment intolérable pour une construction soudée, même si les cordons et leur voisinage présentent la même résistance en traction que la pleine tôle.

De plus, la tenue à la corrosion de cet alliage n'était pas excellente, ce qui était fâcheux au vu de la sensibilité due au faible allongement à la rupture.

Si l'on imagine la violence de l'explosion d'une telle chaudière, pouvant contenir plusieurs centaines de litres d'eau surchauffée, on comprendra qu'il ait finalement été renoncé au Maraging 300, malgré ses performances exceptionnelles.

Sur le plan de la tenue en service, toujours compte tenu de la présence d'eau à près de 300°C, l'alliage inox 18/8 est de loin le plus rassurant : facilement soudable, absolument résistant à la corrosion, il présente un allongement

à la rupture de 40 %, pour une résistance à froid de 55 kg/mm². Malheureusement, ce chiffre déjà assez modeste en comparaison avec les alliages exotiques déjà décrits est encore aggravé par une importante chute de la limite d'élasticité à 270°C, qui devient déterminante pour le dimensionnement. De fait, pour les mêmes conditions de calculs qui conduisent à une enveloppe de 1,2 mm en Maraging 300, on arrive à une épaisseur de 5 mm pour l'inox !

C'est finalement un acier Ni-Cr, commercialisé sous la désignation Inconel 718, qui s'est révélé optimal. Soudable sous atmosphère contrôlée, il présente à 300°C une résistance en traction de 125 kg/mm². Caractéristique encore plus importante, son allongement à la rupture est d'environ 15 %, ce qui réduit considérablement sa sensibilité aux inévitables irrégularités notamment dans les zones des soudures, et il est extrêmement résistant à la corrosion. Dans l'ensemble, sa mise en œuvre est plus aisée que celle du Maraging 300. Alors qu'il était difficile de se le procurer vers la fin des années 60, il est aujourd'hui commercialisé dans des dimensions et des semi-fabriqués très divers.

5. Caractéristiques finales des propulseurs à eau surchauffée

L'étude des divers facteurs mentionnés précédemment a conduit à la mise au point de toute une gamme de propulseurs présentant des caractéristiques communes, mais adaptées à des tâches fort différentes. Il serait trop long de décrire ici toutes les étapes de l'expérimentation qui a précédé la phase opérationnelle de ces propulseurs. Mentionnons simplement que les essais ont couvert aussi bien la fiabilité du fonctionnement, la résistance statique et dynamique, la vérification des performances au banc, sur pistes d'essai ou en vol que l'adaptation optimale aux tâches fixées (fig. 5).

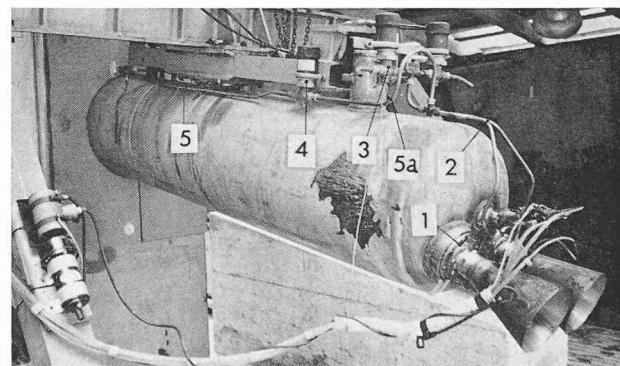


Fig. 5. — Banc d'essais double avec un propulseur monté.
1. Servovalve. 2. Conduites de vidange. 3. Electrovalve d'ouverture. 4. Electrovalve de fermeture. 5 et 5a. Conduites.

Ces caractéristiques vérifiées sont :

- Prix spécifique extrêmement bas de l'impulsion : 1/100 à 1/1000 de celui de propulseurs à propergol.
- Utilisation répétée à volonté, sans précaution spéciale.
- Mise en œuvre très facile, ne nécessitant aucune mesure de sécurité particulière (au contraire des propulseurs à propergol).
- Extrême souplesse d'emploi, par exemple pour accélérer puis freiner une charge au cours du même essai.
- Constance des performances, qui ne dépendent que de la quantité d'eau et de la température de chauffage.

La commercialisation de ces propulseurs était dès lors possible dans une vaste gamme d'application, ce qui constitue une première. Alors que l'on avait pu enregistrer plusieurs applications pratiques en Suisse, c'est de l'étranger que sont venues la plupart des commandes.

TABLEAU I
Caractéristiques des propulseurs POHWARO

Type	Impulsion (kg/s)	Poussée (kg) maximum	Poussée (kg) nominale	Tare (kg)	Eau (l)	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Temps de chauffage (min)
2 500	1 100	250	200	50	19	1 700	170	15
5 500	2 500	1 250	1 000	60	50	2 400	241	15
25 000	11 300	5 000 ¹	4 000 ¹	160	250	2 500	470	65
55 000	25 000	15 000 ¹	12 000 ¹	328 ³	568	3 635	596	80
80 000	36 000	9 500	8 000	408 ⁴	812	5 600	520	210 ²

¹ En phase d'accélération ; freinage également possible.

² Chauffage électrique.

³ Avec 9 tuyères.

⁴ Avec 4 tuyères.

Le tableau I résume les caractéristiques principales de plusieurs modèles ; il faut toutefois relever que la souplesse de la formule de base permet une adaptation facile aux cahiers des charges de chaque application, par exemple en faisant varier la contenance en eau du propulseur par une diminution ou une augmentation de la longueur de la partie cylindrique, ou par le nombre de tuyères.

6. Applications pratiques

A l'origine, le propulseur à eau surchauffée décrit ici a été conçu pour l'assistance au décollage des avions. Souvent, la longueur de la piste disponible, la température ambiante ou l'altitude élevées de l'aérodrome restreignent considérablement la charge pouvant être emportée par les avions, de sorte que les spécialistes se sont depuis longtemps penchés sur le problème du décollage assisté. Les deux seules solutions qui se sont imposées jusqu'ici sur une relativement grande échelle sont la catapulte — à bord des porte-avions — et le propulseur à poudre.

Alors que la première solution requiert d'importantes installations fixes, la seconde est excessivement coûteuse, ce qui les limite pratiquement aux avions militaires.

En pratique, il suffirait dans de nombreux cas d'une impulsion assez modeste pour améliorer considérablement les performances au décollage. C'est pourquoi on pourrait envisager l'installation à demeure d'un petit propulseur auxiliaire, la pénalité de poids étant largement compensée par les gains réalisés sur la charge payante au décollage. Les premières applications décrites ici relèvent donc du domaine aéronautique.

6.1 Décollage court du Mirage IIIS

Le cahier des charges de l'aviation militaire suisse prévoyait que les Mirages IIIS qu'elle a acquis devaient être capables de décoller d'une piste réduite à la portion congrue, par exemple à la suite de dégâts de guerre. La solution développée par l'avionneur consiste à équiper l'avion de



Fig. 6. — Décollage d'un Mirage IIIS équipé de deux propulseurs POHWARO 25 000.

fusées à poudre fixées sur des bâts extérieurs, à l'arrière de l'avion.

De la collaboration de l'ingénieur qui avait réalisé l'intégration de la combustion pulsatoire à un propulseur à eau surchauffée de faibles dimensions et de la Fabrique fédérale d'avions à Emmen est né un système d'assistance au décollage pour le Mirage IIIS, composé de deux propulseurs POHWARO 25 000 (POHWARO = Pulsated Overheated WAter ROcket ; 25 000 = 25 000 lbs/s, soit 11 340 kg/s d'impulsion). Expérimenté avec succès (fig. 6), il a toutefois été mis au point trop tard pour être retenu, malgré les économies substantielles qu'il aurait permis de réaliser : le coût d'un décollage assisté n'aurait été qu'un centième de celui effectué avec des fusées à poudre, compte tenu de l'amortissement de l'équipement...

A partir des expériences extrêmement encourageantes sur le plan technique recueillies lors de la mise au point du propulseur POHWARO 25 000, la Fabrique fédérale d'avions a développé toute une série d'équipements du même type, mais de dimensions adaptées aux applications visées. C'est en effet une caractéristique du propulseur à eau surchauffée de pouvoir être facilement adapté à des exigences précises par la variation du volume et du nombre de tuyères, les éléments de base restant les mêmes.

6.2 Décollage court du Socata MS-880B



Fig. 7. — Décollage d'un MS-880B « Rallye » équipé d'un propulseur POHWARO 2500 (photo A. Hool).

A l'autre extrémité de la gamme en ce qui concerne le décollage assisté, citons l'avion MS-880B, d'un poids maximal au décollage de 770 kg, qui est le premier type à avoir obtenu un certificat civil d'admission à la circulation portant sur un propulseur à eau surchauffée (fig. 7). Le but était entre autres de permettre aux auteurs de se familiariser eux-mêmes avec le pilotage d'avions assistés au décollage. Aucune difficulté n'est apparue, le choix de l'axe des tuyères et la courbe de la poussée par rapport au temps supprimant la nécessité de toute correction de l'assiette de l'avion par le pilote. Cela est heureux, car le décollage dure moins de quatre secondes ! La course au décollage est ramenée de 110 à 30 mètres environ.

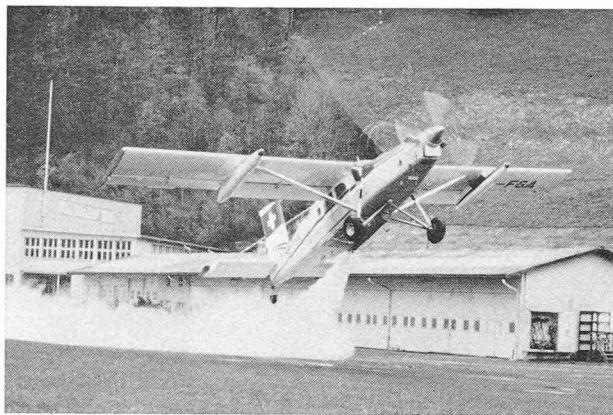


Fig. 8. — Décollage d'un Pilatus Porter équipé d'un propulseur POHVARO 5500 (photo J.-P. Weibel).

6.3 Décollage court du Pilatus Porter

Il peut paraître paradoxal de vouloir raccourcir encore la distance de décollage d'un avion qui doit sa réputation mondiale précisément aux possibilités de décollage court qu'il offre. Il faut toutefois relever qu'il peut être utilisé dans des conditions difficiles (température ou altitude élevées, terrains de mauvaise qualité et encaissés, surcharge) et qu'une amélioration de ces performances ferait reculer encore les limites de son utilisation.

En collaboration avec la maison Pilatus, un Porter a été équipé d'un propulseur POHVARO 5500 (2500 kg d'impulsion), dont la présentation à l'exposition aéronautique internationale de Hanovre, en 1972 a fait forte impression (fig. 8).

6.4 Accélération d'un chariot de 7,6 tonnes, Georgetown (Delaware) USA

La maison américaine All American Engineering (AAE) avait été chargée de mettre au point un dispositif de freinage par câble, analogue à celui utilisé sur les porte-avions, devant permettre à des avions de chasse d'atterrir sur des pistes très courtes. Ce développement nécessitait l'expérimentation du système sur une piste d'essais. Pour ce faire, il fallait accélérer un chariot de 7,6 tonnes, simulant un avion à l'atterrissement, jusqu'à une vitesse de 325 km/h. La maison AAE disposait d'un chariot propulseur, sur lequel étaient montés quatre turboréacteurs provenant de surplus militaires, qui ne suffisait toutefois pas à atteindre la vitesse demandée. Le surplus d'impulsion était primitivement fourni par 3 propulseurs à poudre d'un coût unitaire de 8000 francs par essai.

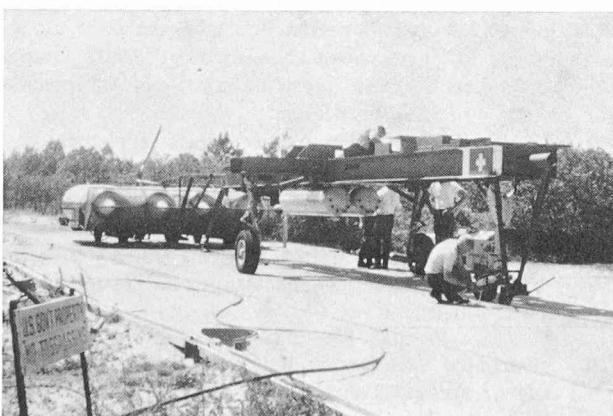


Fig. 9. — Installation d'essais AAE à Georgetown (Delaware), USA. Au premier plan le chariot de 7,6 tonnes équipé de deux POHVARO 25 000 ; à l'arrière-plan, le chariot propulseur équipé de quatre turboréacteurs (photo J.-P. Weibel).

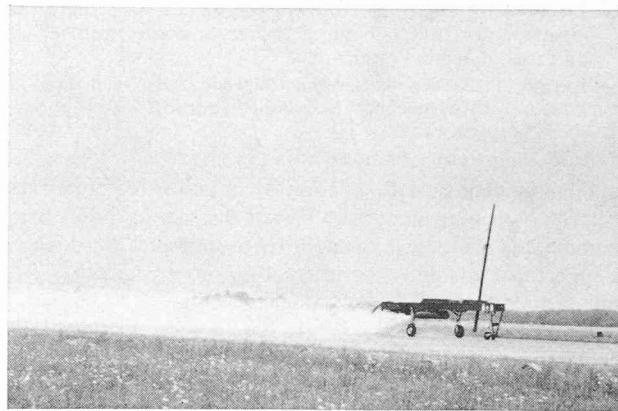


Fig. 10. — Georgetown : après avoir atteint quelque 250 km/h poussé par le chariot propulseur à turboréacteurs, le chariot de 7,6 tonnes accélère à 325 km/h à l'aide de deux POHVARO 25 000 (photo J.-P. Weibel).

Il n'est pas rare que l'un ou l'autre de tels essais doive être répété, les résultats souhaités n'ayant pu être obtenus, ce qui contribue à renchérir considérablement une campagne d'essais déjà onéreuse.

L'utilisation du système développé pour le Mirage IIIS, soit deux propulseurs POHVARO 25 000, a permis de réduire substantiellement les frais de cette expérimentation (fig. 9 et 10). Les spécialistes de AAE ont particulièrement apprécié la précision avec laquelle chaque essai a pu être programmé pour atteindre la vitesse finale prévue, ainsi que la possibilité de répéter à peu de frais un essai n'ayant pas fourni les données attendues.

Il s'agissait là de la première utilisation loin de la fabrique où avaient été conçus et réalisés les propulseurs, donc sans soutien logistique immédiat. Aucun incident ou imprévu n'est venu affecter la disponibilité permanente du système.

6.5 Centre d'Essais des Landes (CEL)

L'Etat français dispose dans la région de Biscarrosse d'un vaste champ d'essais où sont mis à l'épreuve des équipements et des matériels variés, allant d'engins téléguidés au matériel d'infanterie. Parmi les moyens disponibles figurent des rails d'essais dynamiques de longueurs allant jusqu'à plus d'un kilomètre, sur lesquels des éléments d'aéronefs ou d'engins peuvent être accélérés à des vitesses élevées ; ces rails sont complétés par une gamme d'équipements permettant l'observation, la prise de vues cinématographiques, la télémétrie et la télécommande des essais.

Pendant longtemps, les propulseurs à poudre ont seuls été utilisés pour obtenir les fortes accélérations (positives et négatives) et les hautes vitesses requises pour ces essais sur rail. Après une étude comparative extrêmement fouillée, les ingénieurs du CEL sont arrivés à la conclusion que l'utilisation de propulseurs à eau surchauffée permettait dans de nombreux cas d'obtenir les performances exigées pour un coût considérablement inférieur, grâce à l'utilisation répétée de ces propulseurs.

Le SECT (Service des équipements des champs de tir), qui assure l'acquisition des moyens d'essais mis en œuvre par le CEL, commanda à la Fabrique fédérale d'avions la réalisation d'un propulseur destiné à démontrer la tenue en service et les performances du propulseur à eau surchauffée dans l'environnement particulier rencontré lors des essais sur les rails du CEL. Par rapport aux applications précédentes du POHVARO, les exigences étaient considérablement plus sévères :

- Possibilité d'accélérer, puis de freiner une charge utile au cours du même essai.

- Précision très élevée de l'ouverture et de la fermeture, même répétées, des tuyères, afin d'assurer le déroulement exact du programme de l'essai.
- Insensibilité à des accélérations élevées, aussi bien dans la direction de marche que perpendiculairement à celle-ci (imperfections du rail).
- Insensibilité aux vibrations.

Il est évident qu'à l'exception de la première, toutes ces exigences ne pouvaient faire l'objet d'essais au point fixe, comme cela avait été le cas pour les propulseurs précédents. Ce n'est que lors de l'expérimentation sur les rails du CEL que se manifesteraient d'éventuelles lacunes.

Le propulseur utilisé pour ces épreuves de qualifications sur rail était du type POHVARO 25 000, modifié pour permettre le freinage (adjonction d'une tuyère sur le fond avant) et le montage des patins nécessaires à la circulation sur le rail. Les essais ont répondu aux espérances du CEL, de sorte que le SECT passa commande pour l'étude et la réalisation d'un propulseur plus grand et plus puissant, le POHVARO 55 000.

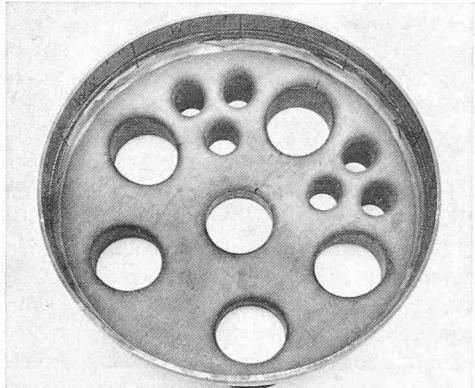


Fig. 11. — Fond arrière d'un propulseur, vu de l'intérieur.

La formule de base, décrite plus haut, n'a fait l'objet d'aucune modification importante, à l'exception de l'adjonction de tuyères de freinage et d'un second générateur thermique pulsatoire, destiné à réduire le temps de chauffage. Comme les tuyaux d'échappement débouchent sur le fond arrière, y occupant une surface importante, leur disposition a été revue pour permettre le placement de 6 tuyères tout en garantissant la résistance structurale nécessaire. La figure 11 montre un tel fond vu de l'intérieur.

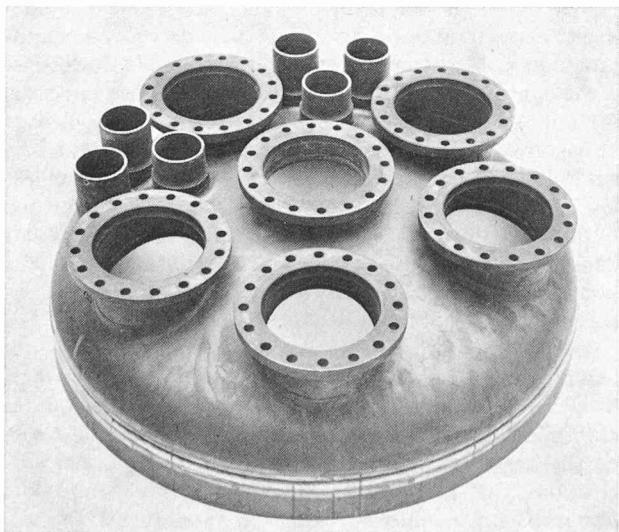


Fig. 12. — Fond arrière d'un propulseur, vu de l'extérieur. Les six flasques servent au montage des tuyères ; les six conduites plus petites assurent le passage des tuyaux d'échappement à travers le fond.

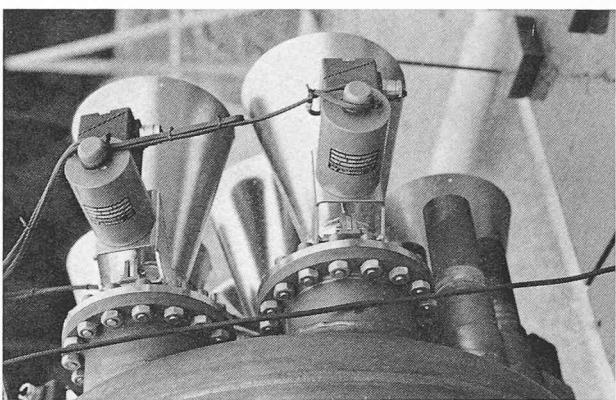


Fig. 13. — Electro-aimants commandant les valves intégrées aux tuyères (photo CEL).

Grâce à la technologie de soudage mise au point par la firme Franke (Aarburg), il a été possible de réduire au minimum le travail de mise en forme des fonds tout en assurant l'indispensable résistance même des soudures effectuées dans des zones fortement sollicitées, utilisant ainsi pleinement les caractéristiques mécaniques de l'Inconel 718 décrites précédemment (fig. 12).

Les essais se déroulant au CEL sont extrêmement courts, de sorte qu'il fallait éliminer tout retard dans l'ouverture et la fermeture des tuyères. Les électrovalves Atkomatic utilisées avec succès jusqu'alors ne permettaient plus de répondre à ces exigences, notamment en raison de la longueur des conduites entre la tuyère et l'électrovalve, liée à la conception même du système de commande des tuyères. C'est pourquoi la Fabrique fédérale d'avions a développé un nouveau type de tuyère à commande d'ouverture et de fermeture intégrée, utilisant un électro-aimant modifié par son constructeur (Magnet AG, Hausen am Albis) pour supporter des intensités passagères élevées, résister aux hautes températures de fonctionnement et offrir une parfaite étanchéité, pour tenir compte des conditions d'utilisation (fig. 13 — on comparera avec la disposition antérieure visible sur la fig. 5).

Le propulseur a été complété par des ferrures de transmission des efforts de poussée et de freinage (fig. 14).

Dès les premiers essais, les résultats ont confirmé les calculs, notamment en ce qui concerne la précision dans le contrôle de la poussée : il s'est avéré possible de prévoir à quelques mètres près la position du véhicule d'essai de 1200 kg après une course comportant une accélération jusqu'à 360 km/h et un freinage jusqu'à immobilisation, pour un parcours total d'environ 200 mètres, en moins de 4 secondes ! La consommation de carburant pour un tel essai est de 90 litres d'essence seulement. Cette charge utile a même été accélérée jusqu'à 510 km/h en 1,5 seconde sur 125 m, puis immobilisée.

Le calcul précis du point d'arrêt permet également des économies indirectes : pour éviter la sortie intempestive du rail d'essai, il est prévu un freinage de secours par un matelas de mousse carbonique, onéreux et d'une durée de vie très courte limitant le temps pendant lequel l'essai est possible. La maîtrise de la cinématique de l'essai permet donc d'y renoncer.

6.6 Véhicule à sustentation magnétique MBB (Messer-schmitt-Bölkow-Blohm)

Dans le cadre d'un programme gouvernemental destiné à la mise au point de nouveaux moyens de transports terrestres à haute vitesse, la maison allemande MBB a développé un véhicule expérimental à sustentation magnétique

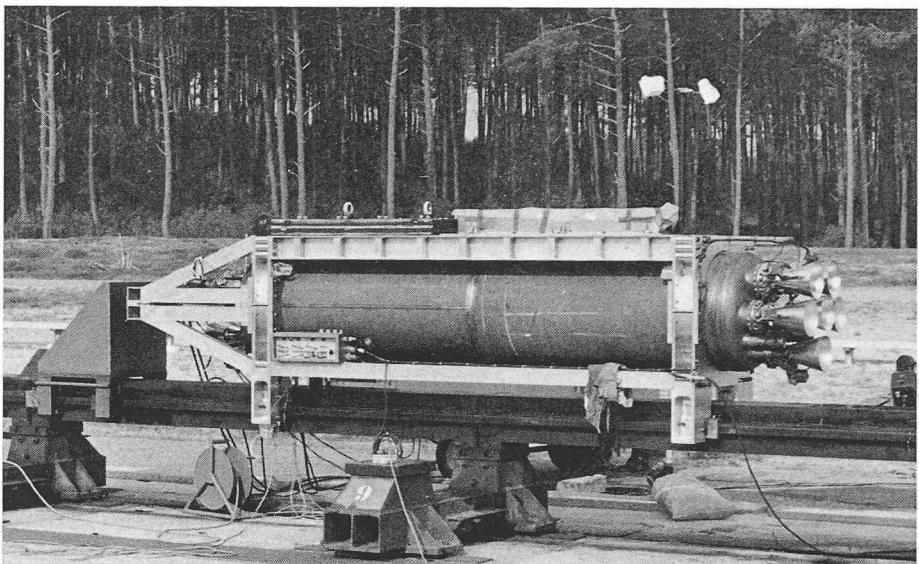


Fig. 14. — Propulseur POHVARO 55 000 sur rail d'essai au Centre d'essais des Landes. Le chariot repose sur quatre patins. A gauche, chariot destiné à recevoir la charge utile (photo CEL).

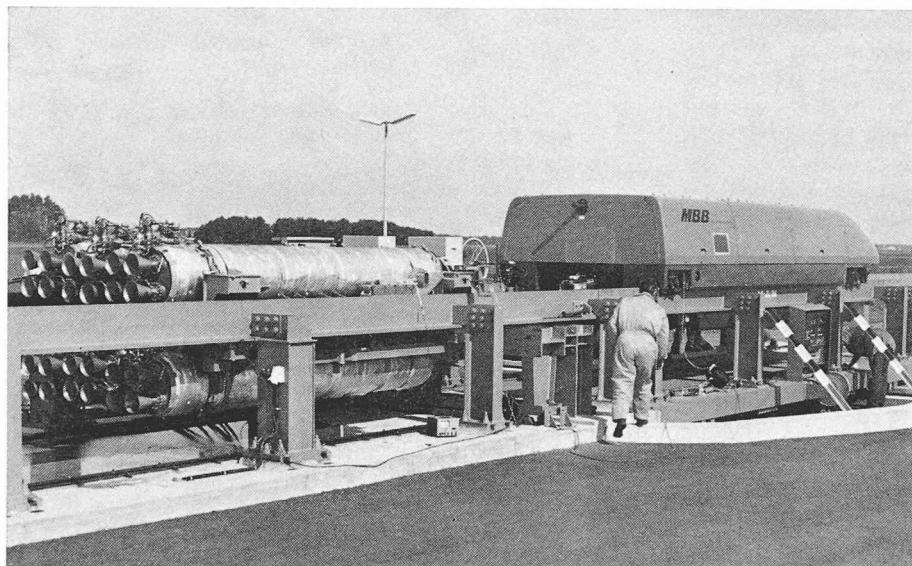


Fig. 15. — Véhicule d'essai à sustentation magnétique MBB. A gauche, chariot propulseur équipé de 6 POHVARO 80 000 d'une poussée maximale totale de 54 tonnes (photo d'usine MBB).

tique et moteur linéaire devant permettre d'atteindre 400 km/h. La longueur restreinte de la voie d'essai exigeait des propulseurs d'appoint pour accélérer le véhicule d'un poids dépassant 10 tonnes.

Aussi bien du point de vue de la sécurité que de celui de l'économie, le propulseur à eau surchauffée constituait la solution optimale, permettant la répétition d'essais à peu

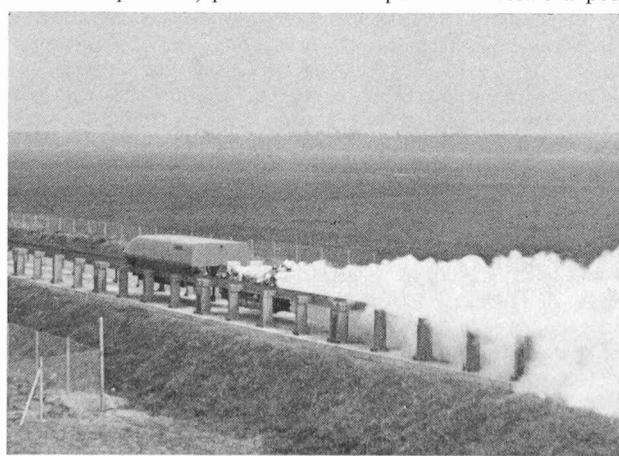


Fig. 16. — Véhicule d'essai MBB en pleine accélération (photo d'usine MBB).

de frais et ne demandant aucune mesure de sécurité particulière. (A ce sujet, on se rappellera que la dernière application ferroviaire de l'eau surchauffée à haute pression date de 1927 : il s'agit d'une locomotive expérimentale de la Fabrique suisse de locomotives à Winterthour, dont la chaudière avait une pression de service de 60 kg/cm², la même que celle des POHVARO !)

Alors que le chauffage par combustion pulsatoire s'impose partout où l'on doit être indépendant d'une infrastructure et lorsque le temps de chauffage est limité, on peut recourir au chauffage électrique si l'on dispose d'une alimentation suffisamment puissante, ce qui est le cas du site d'essai de MBB. Le générateur thermique pulsatoire est remplacé par des corps de chauffe électriques à l'intérieur du propulseur. Il est évident qu'un système mixte peut être envisagé, permettant d'atteindre la température de fonctionnement au moyen du générateur thermique pulsatoire de haute puissance et de la maintenir jusqu'à l'utilisation du propulseur par un corps de chauffe électrique de plus faible puissance. Ce dernier peut par exemple être placé en lieu d'une tuyère.

Le temps de chauffage ne jouant pas de rôle et pour éviter le bruit du générateur thermique pulsatoire, MBB a commandé six propulseurs à chauffage électrique de type 80 000 (36 000 kg/s d'impulsion chacun). La puissance

électrique installée pour le chauffage atteint au total 80 kW, de sorte que la pression de service n'est atteinte qu'au bout de trois heures et demie, alors que les propulseurs précédemment décrits n'ont besoin que de 12 à 80 minutes, selon les dimensions. La poussée nominale des six propulseurs totalisant 24 tuyères atteint 48 tonnes, pour une pointe lors de l'ouverture des tuyères de 57 tonnes (fig. 15 et 16).

Au cours du programme d'essais du véhicule, la vitesse maximale atteinte a été de 432 km/h.

7. Conclusions

Bien que connu depuis très longtemps, le propulseur à eau surchauffée n'avait pourtant pas jusqu'ici réussi à s'imposer, même pour les applications les mieux adaptées à ses possibilités. Les deux problèmes les plus ardu斯 ont été le chauffage de l'eau et la mise au point des accessoires dont dépendait la fiabilité du système.

La combustion pulsatoire a constitué un pas décisif, rendant le propulseur à eau surchauffée indépendant et permettant d'atteindre effectivement les frais d'exploitation très bas inhérents au principe de base très simple.

La sécurité de fonctionnement a été atteinte après de nombreux essais — tous n'ont pas été positifs — et une mise au point minutieuse. L'adaptation des modèles aux exigences particulières des utilisateurs était la tâche la plus simple, tant est grande la souplesse du système.

Les exemples cités sont loin de constituer l'ensemble des applications possibles. Les contacts avec certains utilisateurs potentiels ont montré des réticences — parfaitement infondées — envers un outil semblant relever plus de la

technique spatiale (une « fusée » !) que de réalisations éprouvées. POHVARO est en réalité un exemple de l'application à des tâches terre à terre de connaissances acquises dans un domaine avancé, en fonction des besoins des utilisateurs, sans que ces derniers soient concernés par la technologie employée : la sécurité et l'économie de l'exploitation les intéressent au premier chef.

Le fait d'avoir réussi à exporter des propulseurs à eau surchauffée à combustion pulsatoire, notamment vers l'Allemagne, pays où avaient été effectués presque tous les travaux sur ce type d'engins, constitue certainement le meilleur certificat de réussite. On aurait parfois souhaité que les utilisateurs potentiels en Suisse eussent témoigné du même pragmatisme...

Pour l'avenir, on peut envisager un élargissement de la gamme d'applications des propulseurs POHVARO, dont il n'existe aucun équivalent. Il s'agit de prospector les utilisateurs potentiels afin de les amener à formuler et à chiffrer leurs besoins ; la réalisation des propulseurs correspondants ne présente aujourd'hui aucune difficulté.

Adresse des auteurs :

André Hool, ing. dipl. EPFZ
Im Weizenacker 1

8305 Dietlikon (Zurich)

Jean-Pierre Weibel, ing. dipl. EPFZ-SIA
1141 Vufflens-le-Château.

Les auteurs remercient la Fabrique fédérale d'avions (F+W) à Emmen d'avoir permis la publication de l'article ci-dessus, exposant les travaux qu'ils y ont effectués aux titres de collaborateur libre et de chef du projet. Sauf indication contraire, les photographies sont dues au service photo F+W.

Bibliographie

Méthodes mathématiques non numériques et leurs algorithmes, par A. Kaufmann et E. Pichat. Tome I : Algorithmes de recherche des éléments maximaux. — Un vol. 16 × 24 cm, cartonné, 208 pages, Editions Masson, Paris 1977. Tome II : Algorithmes de recherche de chemins et problèmes associés. — Un vol. 16 × 24 cm, cartonné, 176 pages, Editions Masson, Paris 1977.

Les mathématiques dites « numériques », c'est-à-dire celles qui se rapportent aux fonctions et aux calculs rencontrés sur ces fonctions, ont occupé la scène scientifique depuis quelques centaines d'années. Depuis une vingtaine d'années, les mathématiques ont pénétré avec vigueur dans les sciences humaines : économie, organisation, communication, sociologie, psychologie, didactique, inventique, informatique, etc. Pour ces domaines, le nombre est bien souvent moins important que la configuration. Les méthodes d'énumération des concepts les plus divers rencontrés dans les configurations méritaient un traitement très complet dans un ouvrage approprié.

Avec beaucoup de précautions didactiques, avec de nombreux exemples accompagnés de tous les détails importants et nécessaires, cet ouvrage présente un ensemble des méthodes et d'algorithmes qui constitue un véritable outil de travail. Le volume I traite de la nature particulière des problèmes non numériques, de la présentation d'un sous-ensemble de pavés (derrière ce mot technique se cache un concept fondamental) et des algorithmes en file si efficaces pour rechercher des éléments maximaux des structures algébriques en utilisant l'ordinateur. Ce qui doit permettre d'attaquer des problèmes combinatoires avec lesquels on est très fréquemment confronté. Le volume II va plus loin ; on y trouve les algorithmes de recherche des chemins et des problèmes qui s'y rattachent — l'ensemble constituant un chapitre très complet et particulièrement riche.

Sommaire :

Tome I : I. Nature particulière des problèmes non numériques en mathématiques. — II. Représentation d'un sous-ensemble de pavés. — III. Algorithmes en file pour rechercher les éléments maximaux de structures algébriques.

Tome II : IV. Recherche de chemins et problèmes homomorphes.

Nouveaux équipements pédagogiques, publié par Carlo Testa aux Editions Artemis, Zurich. — 191 pages, 165 photos et 90 plans. Prix : Fr. 48.—.

Les équipements scolaires et pédagogiques forment certainement un domaine privilégié pour le développement des nouvelles théories architecturales et constructives. On ne s'étonne donc pas de voir Carlo Testa, dont l'ouvrage le plus célèbre s'intitule *Constructions modulaires*, aborder dans une nouvelle publication le thème de l'école. Rappelons que Carlo Testa, avant d'avoir été appelé par l'Unesco, a été le créateur du fameux système CLASP bien connu de tous les architectes. C'est donc en parfait connaisseur que l'auteur développe ce difficile sujet qu'est la nouvelle architecture scolaire.

Le premier chapitre traite des sujets suivants : l'école totale ; le plan libre ; l'école polyvalente ; l'école transportable ; l'école de télévision ; l'antiécole ; l'école intégrée. Le deuxième chapitre présente des exemples réalisés dans dix-huit pays. Le troisième chapitre énumère les diverses méthodes ; et le quatrième illustre les conditions techniques et matérielles.

Cet ouvrage, riche d'illustrations, permet d'avoir une vue très complète et très étendue des théories en cours dans le monde entier. De plus, cette publication arrive à point pour faire le bilan des expériences menées jusqu'à présent dans le domaine des constructions scolaires.

A. G.