L'ENGIN D'INTERVENTION VIRGULE UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE TÉLÉOPÉRATEURS

J. VERTUT *

(Manuscrit reçu le 11 mai 1973, mis à jour octobre 1973)

RÉSUMÉ

Le nom de l'engin VIRGULE est constitué des initiales de : Véhicule d'Intervention Radioguidé Utilisable en Laboratoire et à l'Extérieur.

Cet engin est constitué d'un véhicule téléguidé, capable de se déplacer sur tout terrain, portant une paire de télémanipulateurs et des caméras de télévision. On appelle un tel engin : téléopérateur, car son emploi revient à remplacer, dans le milieu hostile ou à distance, un opérateur qui pourrait y effectuer directement son travail ; un bon téléopérateur permettrait ainsi de remplacer le mieux possible l'opérateur travaillant directement.

L'engin VIRGULE est équipé d'une paire de télémanipulateurs maître-esclave à asservissement électronique, type MA 22, capables d'exercer en toute direction un effort de 120 newtons (≈ 12 kg) et de soulever 40 kg dans certaines positions. Ce nouveau modèle de manipulateur a été étudié spécialement pour cet usage sur véhicule mais pourra évidemment être utilisé dans les laboratoires chauds.

On appelle « Maître-esclave » les manipulateurs qui sont couramment utilisés dans ces laboratoires et ont pour particularité dans leur version à commande purement mécanique de reproduire à l'aide de leurs pinces tous les mouvements imprimés par la main de l'opérateur à leur poignée, et inversement de restituer au niveau de cette poignée les efforts appliqués ou subis par la pince. De même, le manipulateur MA 22 réalise cette reproduction des mouvements et le retour d'effort sans liaison mécanique directe.

Pour cela, il est optimisé pour donner dans un poids réduit une force maximale et une inertie minimale. Il est actionné par des moteurs couples spéciaux contrôlés par des amplificateurs à haut rendement dans une boucle d'asservissement bilatérale qui permet, comme il est dit précédemment, la copie de mouvement, d'une part, et le retour d'effort, d'autre part.

Le véhicule-support possède quatre roues, dispose d'une extrême souplesse d'évolution et son essieu avant, extensible, lui permet, en position large, d'affronter des terrains très accidentés en toute stabilité et, en position rétractée, de passer par la largeur d'une porte normale (0,80 m). Le véhicule peut se déplacer en ligne droite dans toute direction par rapport à son axe propre ; de plus, il peut pivoter autour d'un centre de rotation quelconque et non pas seulement par rapport à un centre de rotation situé sur son essieu arrière, comme sur les véhicules habituels.

* Commissariat à l'Energie Atomique - DPr/STEPPA - CEN/Saclay B.P. n° 2 - 91190 Gif sur Yvette.

Le pilote commande toutes les évolutions du véhicule à partir d'une poignée identique à celle des manipulateurs, poignée à trois degrés de liberté commandant simultanément les déplacements en avant et en arrière, la rotation à droite ou à gauche, et la direction du déplacement en ligne droite. Ces mouvements seront d'ailleurs commandés par la poignée de l'un des deux manipulateurs mis hors service pendant les déplacements du véhicule.

La commande de l'engin VIRGULE nécessite, d'une part, la transmission de signaux analogiques (valeur des positions des bras du manipulateur ou des roues du véhicule) et des signaux tout ou rien commandant divers circuits. L'ensemble est transmis du poste de commande au véhicule après codage digital par un système comportant 24 canaux analogiques dont 16 utilisables en permanence pour les deux manipulateurs ou un manipulateur et le véhicule. Il y a de plus 16 canaux analogiques dans le sens véhicule - poste de commande, et la transmission des images de télévision.

La transmission peut être réalisée après ce codage soit par deux câbles coaxiaux de faible diamètre, soit par liaison radio.

Dans sa première version, l'engin VIRGULE, d'un poids de 500 kg environ est capable de monter des escaliers, et sa batterie lui accorde une autonomie de 4 heures environ. A l'intérieur d'un bâtiment, VIRGULE peut, à l'aide de ses propres manipulateurs, se brancher pour la charge de ses batteries sur le secteur; pour le travail en terrain découvert, un apport d'énergie peut être réalisé à l'aide d'un autre véhicule à l'étude portant un groupe électrogène à moteur à essence. L'usage de piles à combustible est envisagé.

Le véhicule proprement dit poursuit ses essais depuis juillet 72, le premier manipulateur MA 22 est actuellement en cours d'essai, la télécommande digitale sera essayée sur le véhicule en juin 1974, le second manipulateur est prévu fin 1973 le montage d'ensemble est prévu en 1974 ; en 1975, l'équipement de télévision doit être réalisé.

ABSTRACT

VIRGULE is a French acronym for "radio-controlled rescue vehicle capable of operating over rough terrain either indoors or outdoors".

This machine is a remote controlled vehicle carrying one pair of telemanipulators and TV cameras. Such a machine is now called teleoperator, as it replaces a man to work into an hostile environment. A good teleoperator makes possible to replace the operator as much as possible, this operator being still in the control loop.

— VIRGULE is equipped with one pair of MA 22 compact bilateral servo master slave manipulators, capable of exerting a 120 newtons force in any direction and of lifting up to 40 kg in certain positions.

This new manipulator is especially tailored for this vehicle but will be also very useful for hot laboratories. We can recall that "master slave" manipulators, as usually utilized in these laboratories in pure mechanical types, reproduce with their tong all motions exerted by the operator at the handle, and they feed back at the handle level all efforts applied by and/or to the tong. The electronic MA 22 model is doing the same without any mechanical link.

This new model is optimized in mass and in capacity-to-inertia ratio. Its high torque low inertia DC motors are driven by high efficiency (low heat dissipation) amplifiers into a fully symmetrical bilateral servo loop.

The four wheeled vehicle has an extreme flexibility and its wider front axle is giving a good stability in rough terrain, but can be retracted to a door width (0,80 m). The vehicle can move straight in any direction (referred to its own axis) and can steer about any center of rotation, controlled by a single control handle with three degrees of freedom. These handle will be one manipulator handle as only one arm can be operated while the vehicle is moving (one only operator can operate one master arm and the vehicle rate control handle).

A 24 channel digital communications link is used for control, a 16 channel one for manipulators feed back, which can be transmitted on the same frequency with TV signals.

These links may be radio or thin coaxial cable. On this first version (devoted to nuclear teleoperations and/or explosive hazard) the teleoperator for earth operation weights around 500 kg, and is capable of climbing stairs.

Batteries provide four hours (500 watts average) autonomous operation ; power mains (indoors) and an extra gasoline-engine-driven generator on an ancillary vehicle (outdoors) can be used for long operation. Use of Fuel cells is planned.

Vehicle is working since july 1972 - First MA 22 is on testing stage now (october 1973). The digital link is to be tested in june 1974. Second arm is planned for end of 1973. Full assembly is to be tested in 1974 - 1975 is for operational stage with TV.

HISTORIQUE DES ENGINES D'INTERVENTION

L'étude et la réalisation d'engins d'intervention ont été entreprises il y a déjà longtemps aux Etats-Unis en liaison avec les grands premiers programmes concernant des réacteurs de technologie avancée : notamment le projet d'avion à propulsion nucléaire avant 1960, puis le programme d'essais à terre du réacteur de propulsion spatiale de la fusée NERVA. Par contre, on ne peut pas dire que des engins évolués aient été réalisés pour les seuls besoins des réacteurs de puissance. Cependant, pour les besoins des laboratoires chauds, on a également réalisé, depuis relativement longtemps, de petits véhicules sur chenilles commandés par câble multiconducteur et portant sur une colonne télescopique un bras de manipulateur motorisé existant. Le plus courant de ces manipulateurs sur véhicule a été réalisé, en dix exemplaires environ, par P.A.R., engins dont le C.E.A. possède un exemplaire. Ce dernier fut spécialement adapté aux interventions en général, il est opérationnel depuis trois ans sous le nom de GM 2 T.

Parmi les premiers engins importants, nous citerons l'engin BEETLE portant une cabine blindée de 30 cm de plomb transportant un seul pilote, réalisé à partir d'un châssis de char d'assaut (voir fig. 1) ; un autre engin également ancien réalisé par HUGUES aux Etats-Unis est le MOBOT représenté figure 1, il comportait deux bras, des appareils de télévision, une petite grue, le tout porté sur des chenilles réalisées spécialement, il est téléguidé par un câble unique et une transmission d'ordres codée. Ces deux premiers engins n'ont jamais été utilisés en actif et, d'autre part, n'ont pas atteint le but qu'on leur avait fixé. Le premier, par son poids excessif, ne pouvait pas quitter une bonne route et le second, par ses chenilles, engendrait de grosses vibrations sur le sol dur et s'enlisait néanmoins sur sol meuble.

L'engin MR MU également figure 1, réalisé par l'Armée de l'Air américaine, est également construit à partir d'un châssis de char, mais comporte une liaison radio; il s'agit du premier appareil dont l'usage en actif aurait pu être possible. Le petit engin PAR (fig. 3) sortait en 1962, quelques années avant l'engin MR MU, au moment où nous venions de réaliser un premier véhicule commandé par câble, sur roues, portant un manipulateur de capacité une tonne, réalisé avec la Sté Oter.

a

b

c

d

FIG. 1.

a) le Beetle (Scarabée). Réalisé à partir d'un char, la cabine blindée de 30 cm de plomb (ici ouverte) porte deux bras "General Mills" de force 1000 Newtons. Ce bloc peut s'élever jusqu'à 6 mètres sur verins télescopiques. D'une masse de 80 T cet engin n'a pu quitter le sol ferme

b) le Mobot. Ses deux bras protégés par des soufflets de caoutchouc sont aidés par une potence de levage et des fourches de manutention. Deux bras porteurs de caméras de télévision complètent l'ensemble. Les batteries sont constamment rechargées par le câble de télécommande. Trop lourd pour ses petites chenilles métalliques, cet engin n'a pas donné satisfaction.

c) MRMU. Portant deux grands télémanipulateurs et des caméras sur longues perches mobiles, cet engin commandé par radio a satisfait aux essais. Un engin similaire sera opérationnel en Allemagne Fédérale d'ici peu. Il porte un seul manipulateur et s'appelle MF 2.

d) Véhicule OTER avec manipulateur 11 000. Cet ensemble réalisé en 1961 en France porte le premier manipulateur de force 10 000 newtons ; le véhicule sur pneus est alimenté en courant triphasé et commandé par le même câble spécial multi-conducteur. Une pompe hydraulique assure l'alimentation des moteurs de traction et du manipulateur, par servo-valves.

(fig. 1) Cet appareil ne fut pratiquement jamais utilisé. Plus récemment un projet britannique conduisait à l'étude d'un engin, le RIVET représenté figure 2, très révolutionnaire en tant que véhicule capable de négocier des obstacles très difficiles à franchir, tels que caniveaux, escaliers, marches très élevées, etc... Cet engin, également commandé par câbles, portait un seul manipulateur ; il ne fut pas construit.

FIG. 2. — Cet engin malheureusement non réalisé, est basé sur un véhicule totalement original dont le " corps " est orientable par rapport aux chenilles. Ce " corps " porte de plus deux roues que le mouvement précédent permet d'appuyer sur l'obstacle. Un véhicule dérivé de celui-ci avec quatre chenilles est actuellement en réalisation en Allemagne Fédérale sous le nom de M F 3.

Du côté des télémanipulateurs, outre les appareils classiques de laboratoires chauds, télémanipulateurs maître-esclave mécaniques, on voyait se développer des télémanipulateurs électriques destinés à des efforts plus élevés, mais d'un contrôle très lent à partir d'une boîte à boutons. On a voulu reproduire à grande distance et par contrôle électrique ou électronique, les qualités des manipulateurs maître-esclave mécaniques et on peut citer, dès 1960, les bras maître-esclave hydrauliques réalisés par General Electric dans le cadre du même projet d'avion nucléaire, ces manipulateurs étant destinés à la maintenance près du réacteur. A la même époque, les premiers bras maître-esclave électriques à asservissement étaient construits par l'équipe d'Argonne qui venait de développer les manipulateurs maître-esclave mécaniques. Ce développement s'inscrivait dans des programmes prévoyant de très grandes cellules chaudes et notamment un réacteur à

FIG. 3. — L'ensemble GM 2 T

- 1) camionnette aménagée
- 2) poste de commande installé dans celle-ci aisément transportable à bras d'hommes
- 3) véhicule PAR avec manipulateur sur colonne
- 4) 5) Caméras de télévision
- 6) rampes amovibles pour l'accès du véhicule

neutrons rapides dont la piscine de sodium était ouverte dans une grande salle maintenue en argon très pur et blindée. Une équipe italienne réalisait sous le nom de MASCOT des bras similaires dès 1961.

Ces bras maître-esclave électroniques ou électro-hydrauliques utilisant les composants de l'époque étaient lourds, complexes et très coûteux.

C'est dans cette situation que le projet VIRGULE a été lancé et son départ était soutenu par l'existence de l'ensemble GM 2 T (représenté figure 3) réalisé à partir d'un manipulateur sur véhicule PAR. Cet ensemble a réussi plusieurs interventions particulièrement importantes, telles plusieurs récupérations de sources de cobalt accidentellement tombées au voisinage des cellules chaudes de production, récupération d'une source de 20 000 Ci dans une installation d'irradiation ne possédant aucun accès pour des télémanipulateurs classiques, prouvant lors de ces différentes interventions le bien-fondé de l'existence d'un tel ensemble opérationnel. L'opération la plus délicate a été réalisée à Pierrelatte où un appareillage chimique, devenu explosif, causa un accident et a dû être démonté. Ce démontage comprenait la mise sous azote liquide des éléments dangereux, la coupe à la cisaille de tube en acier spécial, de diamètre 14 mm, le transport sur un parcours important de ces appareillages et leur noyage final. Ce travail réalisé à une distance de l'ordre de 30 m avec télévision, sans aucune possibilité d'intervention directe pendant plusieurs jours fut une expérience extrêmement utile.

On sait aujourd'hui que les manipulateurs du type de ceux de l'engin GM 2 T permettent la réalisation de travaux simples au prix d'un temps extrêmement long, encore plus long si l'engin ne porte qu'un seul bras. Leur lenteur est due au mode même de commande de ces télémanipulateurs, contrôlés à partir de boîtier à boutons dont la combinaison demande une extrême fatigue mentale à l'opérateur, avec la nécessité d'examiner plusieurs écrans de télévision et de commander des déplacements continuels des caméras. Dans ces conditions, il faut environ un temps 50 à 100 fois supérieur au temps de travail direct pour effectuer un travail donné.

C'est pourquoi le cadre général du projet VIRGULE était, dès le départ, de réaliser une recherche étendue sur la télécommande de véhicules et de manipulateurs efficaces sur une portée de l'ordre du kilomètre et en terrain quelconque. Au besoin d'efficacité dans la télémanipulation répondait l'usage du manipulateur maître-esclave électronique et ceci obligeait à l'adapter en volume, en poids et consommation d'énergie aux très dures conditions d'un véhicule autonome.

2 - GÉNÉRALITÉS SUR LE TÉLÉOPÉRATEUR VIRGULE

L'étude de l'engin VIRGULE prend donc la suite des travaux précédents en visant à la réalisation d'un engin opérationnel capable de travail efficace en milieu radioactif contaminé ou sous rayonnement et d'une façon générale en milieu hostile.

L'efficacité de l'intervention a constitué le facteur prioritaire tout au long de cette étude. La figure 4 évoque les premiers travaux.

FIG. 4 — Projet Virgule à ses débuts

- a) premier véhicule VIRGULE. Réalisé en 1965, de forme carrée (1,4 m $\times$ 1,4 m) il a permis de tester les caractéristiques de base de l'engin actuel
- b) premier dessin conceptuel du téléopérateur VIRGULE basé sur le véhicule précédent.

2. 1 - LES MANIPULATEURS

VIRGULE porte une paire de manipulateurs maître-esclave ; ces derniers sont de la même famille que ceux utilisés dans les cellules chaudes mais, à l'aide d'asservissement électronique bilatéral, ils permettent le même travail sans la liaison mécanique directe des manipulateurs maître-esclave mécaniques. On rappelle ici que les manipulateurs maître-esclave généralement mécaniques ont pour caractéristique absolue la totale réversibilité : le mouvement est transmis de la poignée à la pince ou de la pince à la poignée exactement de la même façon d'où le terme d'asservissement bilatéral. Il en résulte d'une part une parfaite combinaison des mouvements qui reproduisent ceux transmis directement par la main de l'opérateur à la pince du manipulateur, mais aussi le retour de la sensation d'effort transmis ou subis par cette pince. Grâce à tout cela, ces télémanipulateurs permettent la réalisation d'un travail dans un temps de 2 à 6 fois supérieur au

temps nécessaire directement à la main. Le manipulateur MA 22 est prévu pour une force en toute direction de 120 à 150 newtons (≈ 12 à 15 kg); afin de réduire la fatigue et grâce à l'usage de l'asservissement, l'opérateur n'exercera jamais un effort supérieur à 40 newtons, le système procédant à une multiplication de l'effort du maître vers l'esclave, passant du rapport 1 pour 1 au rapport 3 pour 1.

On notera par ailleurs qu'un tel bras peut également être contrôlé par d'autres modes, notamment être programmé pour la répétition rigoureuse d'un même travail ou commandé avec l'assistance d'une calculatrice.

2. 2 - LE VÉHICULE

Afin de permettre les déplacements à travers d'extrêmes difficultés, le système de conduite du véhicule doit apporter une extrême souplesse. Ceci est plus particulièrement nécessaire lorsqu'on sait que les conditions de vision par la télévision restent toujours imparfaites. A cela, s'ajoute la nécessité pour le véhicule de constituer « le corps » de la paire de manipulateurs, ce qui nécessite des déplacements inhabituels pour un véhicule, comme notamment les déplacements latéraux qui sont pourtant très spontanés lorsque l'opérateur se déplace autour de l'objet de son travail.

Une calculatrice géométrique originale fournit la coordination des directions et des vitesses pour chacune des quatre roues du véhicule, permettant ainsi à l'engin VIRGULE de se déplacer en ligne droite, en toute direction, par rapport à son axe propre, et de tourner autour d'un centre de rotation quelconque qui est défini par sa direction et sa distance du véhicule. Enfin, pour affronter plus facilement les passages étroits mais conserver la meilleure stabilité sur un sol accidenté, l'essieu avant comporte deux roues dont l'entr'axe peut varier du simple au double.

D'une façon générale, vu la nature très élaborée des ordres donnés normalement aux télémanipulateurs (ordre de position précis et variant rapidement), il est prévu d'envoyer au véhicule des ordres redondants permettant de faire face à un grand nombre de pannes : ainsi au lieu d'envoyer un ordre unique de courbure et un ordre unique de direction du centre de rotation, on a préféré envoyer les quatre directions des roues et leurs quatre vitesses, permettant ainsi au poste de commande de faire face à toute panne comme celle d'une roue qui refuserait de pivoter et qui obligerait alors, pour un retour devenu délicat, à des données de conduite spéciales que l'opérateur peut toujours maîtriser, mais qu'un automatisme porté sur l'engin ne pourrait pas donner directement.

2. 3 - LES TÉLÉVISIONS

La caméra de télévision principale sera placée en respectant le mieux possible la position relative de la main et des yeux. Différents systèmes de mobilité de la caméra seront essayés en 1974 : la commande par la tête de l'opérateur, par la direction du regard, et notamment un mode plus simple que nous envisageons dès maintenant, et qui consiste à asservir la caméra de sorte que son objectif se pointe en permanence sur la pince d'un manipulateur.

Afin d'intégrer tous les sens de l'opérateur et notamment le sens de l'espace et de l'orientation, un soin tout spécial sera apporté à la conception du poste de commande qui sera réalisé en dernier. On doit notamment placer les écrans de télévision dans la même géométrie pour l'opérateur que celle qui entoure l'engin lui-même et en respectant toujours la direction par rapport au télémanipulateur. De même l'orientation du siège de l'opérateur par rapport à l'axe du véhicule devra être liée à la direction préférentielle de conduite en ligne droite qui peut être oblique par rapport à l'axe général du châssis. Deux autres caméras, dont au moins une sera utilisée en permanence, assureront la vision latérale et notamment seront utilisées lors de la conduite du véhicule. De même, pour éviter la commande séparée de l'orientation de cette seconde caméra, elle sera solidaire d'une roue et suivra celle-ci lors du braquage.

2. 4 - LES TRANSMISSIONS

Pour les courtes distances de télécommande, probablement jusqu'à 300 mètres, deux câbles coaxiaux miniatures seront suffisants. Il est alors envisagé de les lover dans un petit conteneur assurant le déroulement à la demande à l'aller et peut-être au retour. Après usage, ce câble pourra être jeté s'il s'agit d'un travail actif ou réenroulé s'il s'agit d'un travail inactif. Pour les longues distances, jusqu'à 1 km et plus, une communication radio dans les deux sens sera utilisée. Dans les deux cas, une unité de codage digital assure le multiplexage des différentes voies de commande des deux manipulateurs, du véhicule, et des différents auxiliaires.

L'ensemble de transmission est réalisé de façon modulaire, permettant ainsi le choix de la transmission par câble ou par radio, compte tenu des conditions du milieu et de la sécurité de l'opération.

2. 5 - LA FOURNITURE D'ÉNERGIE

Tous les équipements sont très sévèrement étudiés du point de vue de leur rendement en énergie et on peut ainsi prévoir quatre heures environ de fonctionnement autonome sur batteries. Dans le cas où la nécessité d'une réduction de poids serait impérative, ces batteries pourraient être réduites au détriment de l'autonomie. Cette autonomie est, de toute façon, insuffisante pour un travail important et le programme prévoit un deuxième véhicule léger d'observation portant un groupe électrogène à moteur à essence, cet engin pouvant contribuer à l'alimentation de longue durée du premier engin. On a prévu de ne pas placer un moteur bruyant sur le téléopérateur VIRGULE qui, nécessairement, devra ajouter aux différents retours d'informations, l'écoute de la zone de travail par microphone, laquelle joue un rôle important pour la conduite de l'intervention.

On a depuis le début de ce programme réservé au maximum la possibilité d'usage de piles à combustible qui ne sauraient tarder à être disponibles et apporteraient une autonomie améliorée et un gain de poids éventuel.

3. - DESCRIPTION D'ENSEMBLE DE L'ENGIN VIRGULE (fig. 5)

L'essieu arrière du véhicule présente une largeur permettant le passage d'une porte normale de 80 cm ; l'essieu avant est rétractable jusqu'à la même valeur, mais peut s'étendre jusqu'à sa largeur maximale hors tout de 1,40 m. La longueur hors tout de l'ensemble est 1,60 m. La hauteur de la plateforme est de 40 cm environ.

FIG. 5. — Modèle réduit de VIRGULE montant des marches d'escaliers

- 1) manipulateur bras droit
- 2) caméra TV principale
- 3) support articulé portant les deux bras et TV
- 4) essieu avant en position large
- 5) caméra TV auxiliaire posée sur roue avant gauche
- 6) batteries
- 7) bloc électronique
- 8) essieu arrière pivotant portant les émetteurs-récepteurs

Les deux manipulateurs MA 22 et la caméra principale sont portés par un même bras articulé pouvant pivoter au centre de l'essieu avant. Les mouvements de ce support permettent d'atteindre le sol sur tout le pourtour du véhicule jusqu'à l'essieu arrière, sur la hauteur normale d'une table et à l'extrême jusqu'à la hauteur de 2,50 m environ. Par ailleurs, l'essieu avant pouvant être rétracté d'un seul côté, les manipulateurs peuvent ainsi avoir un accès particulièrement commode au sol et même, éventuellement, au dessous du niveau du sol.

Le châssis proprement dit est un simple tube axial reliant l'essieu avant et l'essieu arrière, ce tube supportant dans la partie centrale les éléments lourds, batterie et électronique. L'essieu arrière est pivotant, permettant ainsi au véhicule de se conformer à un sol accidenté. Le bloc central des batteries et amplificateur constitue un très bon plan de travail sur lequel des travaux délicats peuvent être effectués. La plage arrière sur l'essieu pivotant doit recevoir des éléments légers, telle une caméra auxiliaire de télévision. Une caméra auxiliaire peut par ailleurs se placer directement sur chaque roue et, pivoter en même temps que cette dernière, sans nécessiter d'ordres spéciaux d'orientation.

4. - DESCRIPTION ET CARACTÉRISTIQUES DU MANIPULATEUR MA 22

4.1 - GÉNÉRALITÉS

Ce manipulateur dérive directement du manipulateur MA 11, réalisé depuis 1965, en 300 exemplaires environ. Sous le nom de MA 11-3000 une étude restée inachevée avait permis d'envisager un manipulateur mécanique maître-esclave dont l'opérateur assurait le contrôle depuis le toit du réacteur de Saint-Laurent I et dont les éléments articulés, suivant le parcours des éléments combustibles dans les canaux, permettaient de descendre le bras-esclave jusqu'à la zone de l'entre-sol où le travail de nettoyage et de réparation était envisagé. Un ensemble de télévision descendu de façon analogue par un canal voisin permettait l'observation du travail. La transmission, purement mécanique, par rubans et divers éléments importants de cet ensemble ont été essayés en grandeur, les études de détail, réalisées pour la partie terminale côté esclave, mais l'ensemble ne fut pas réalisé. Un grand nombre des solutions envisagées lors de cette étude a servi pour la conception du manipulateur MA 22.

Ce manipulateur comporte un asservissement électronique bilatéral. Des engins similaires ont déjà été réalisés il y a longtemps aux Etats-Unis, un modèle similaire réalisé en Italie (le MASCOT). Ces appareils restés expérimentaux furent construits en quelques exemplaires ; ils utilisent tous l'asservissement à moteurs diphasés. Un usage particulièrement intéressant de ces manipulateurs concerne le tunnel des grands accélérateurs ; notre collègue Carl FLATAU à Brookhaven (U.S.A.) a réalisé pour cet usage un prototype très révolutionnaire par rapport aux précédents, utilisant notamment un asservissement et des moteurs à courant continu. C'est en liaison avec ce dernier que nous avons réalisé dans le MA 22 une synthèse de notre expérience mécanique des MA 11 et de son expérience personnelle des boucles d'asservissement en courant continu.

Notre manipulateur est donc le premier bras maître-esclave, spécialement étudié pour être monté sur un véhicule ; il est en même temps le premier qui résulte d'une collaboration internationale (très proche bien qu'à longue distance), cette coopération a donné une boucle d'asservissement de départ du MA 22, a permis la réalisation rapide par notre Section à Saclay du premier ensemble électronique destiné au prototype*. En ce qui concerne la mécanique, elle résulte de

* Qu'il soit permis ici de remercier et de féliciter les techniciens électroniciens de la Section EMH de leurs efforts fructueux dans cette réalisation où le modèle d'origine a reçu de nombreux perfectionnements.

la même coopération que le manipulateur MA 11 étudié et réalisé par les équipes conjointes de la Sté La Calhene et de notre section, notre partenaire y participant financièrement.

Grâce à tous ces efforts et en nous appuyant sur les difficultés particulières posées par l'installation sur véhicule du manipulateur, l'excellent déroulement de cette construction nous permet de penser que ce nouveau manipulateur électronique maître-esclave va franchir le hiatus qui existait entre le développement des divers modèles précédents et un matériel industriellement viable. Il sera donc non seulement utilisé sur l'engin VIRGULE, mais permet de prévoir une utilisation en cellule chaude; il semble qu'une version sous-marine puisse voir le jour rapidement; enfin, il semble que l'utilisation spatiale d'un bras directement dérivé du MA 22 puisse être envisagée.

La conception générale a été centrée avec une inlassable insistance vers l'allègement, la diminution de la consommation électrique et la construction robuste et simple.

4. 2 - PARTIE MÉCANIQUE DU MANIPULATEUR MA 22

Le bras-maître et le bras-esclave sont similaires, le bras dit « maître » étant actionné directement par l'opérateur et le bras « esclave » placé en milieu hostile. La figure 6 montre les différents mouvements du manipulateur : un mouvement d'épaule autour de l'axe horizontal d'épaule, une rotation latérale autour de l'axe du bras supérieur, un mouvement de coude, un mouvement dit d'azimut correspondant à la rotation de l'avant-bras autour de son axe, enfin les mouvements du poignet, rotation et élévation de la pince, laquelle possède de plus son mouvement de serrage. Ces mouvements sont à peu de chose près ceux du manipulateur MA 11 précédemment cité. Si on comparait la disposition de ce bras à celle d'un bras humain travaillant au même lieu, on constate que l'avant-bras du manipulateur correspond au bras de l'homme et le bras supérieur à l'avant-bras de celui-ci comme il est montré sur la figure 7. On voit alors que cette disposition présente plusieurs avantages, notamment celui de ne pas gêner par l'accès venant du haut, la vision venant de face. Un autre avantage important concerne le mouvement d'azimut de l'avant-bras du manipulateur pour lequel cette disposition permet une course d'un tour complet alors que la main ne peut pivoter à l'extrémité de l'avant-bras humain que de 120° environ ; il en résulte que sans déplacer le manipulateur, l'opérateur se déplacera lui-même près du bras-maître pour utiliser la totalité du champ de ce manipulateur, limitant ainsi les déplacements du « corps » qui est le véhicule proprement dit.

Ce manipulateur doit transmettre des efforts à l'aller et au retour avec une grande souplesse, c'est pourquoi le bras doit être équilibré. On voit, figure 6, l'une des originalités principales de la mécanique du MA 22 dans la disposition de 4 moteurs qui animent respectivement la pince (rotation, élévation et serrage) et l'avant-bras (mouvement d'azimut) et qui sont groupés dans un bloc articulé qui se déplace autour d'un axe parallèle à celui du coude à l'extrémité d'un prolongement du bras supérieur au-delà de l'articulation d'épaule. La distance de ce bloc par rapport à l'épaule et son dimensionnement permettent de réaliser un équilibrage exact du bras supérieur et de l'avant-bras dans les mouvements de coude,

FIG. 6. — Bras esclave du MA 22

- 1) axe d'épaule, fixe dans l'espace
- 2) axe de coude
- 3) axe du poignet
- 4) mouvement latéral par rotation du bras supérieur
- 5) azimut ou rotation d'avant-bras
- 6) rotation de pince

- a) corps
- b) bloc moteurs assurant l'équilibrage
- c) bras supérieur
- d) avant-bras
- e) différentiel triple

d'épaule et de rotation latérale. On constate en effet que l'articulation d'épaule portée par une fourche permettant en même temps le mouvement d'épaule et la rotation latérale du bras constitue un support cardan tel que le bras se déplace toujours autour d'un point qui est l'intersection des axes du bras supérieur et de l'épaule. Cette fourche support est portée par le bloc du manipulateur, bloc qui contient les trois derniers moteurs nécessaires à la réalisation des mouvements d'épaule, de rotation latérale et de coude.

FIG. 7 — Géométrie comparée du bras MA 22 et du bras humain

MA 22 : 1) axe du mouvement d'épaule 180° , 2) axe du mouvement de coude $\pm 45^\circ$, 3) axe du mouvement d'élévation de la pince $\pm 45^\circ$, 4) bras supérieur et mouvement latéral $\pm 60^\circ$, 5) avant-bras et azimut (350°) (la même flèche indique la rotation d'azimut de la pince), 6) rotation de pince (360°).

Bras : 1) axe d'épaule donnant un mouvement équivalent au coude du MA 22; 2') axe de coude donnant un mouvement équivalent à l'épaule du MA 22; 3) élévation de la main (faible course); 4') rotation autour du bras équivalent au déplacement latéral du MA 22; 5') flexion du poignet, équivalent à l'azimut 5 mais limité à 120° ; 6') rotation d'avant-bras équivalent à la rotation de pince 6, mais uniquement quand la main est en ligne avec l'avant-bras; 7) mouvement d'écartement du bras n'existant pas sur le manipulateur; il permet notamment de placer l'avant-bras dans l'axe de la main quand nécessaire, ou d'atteindre un point sans que le coude ne rencontre un obstacle.

Différents pignons assurent l'exécution de ces différents mouvements au niveau de l'épaule du coude, il serait ici fastidieux de décrire en détail cette transmission. Il est important néanmoins de noter que ces différents moteurs ne sont que rarement actionnés seuls pour un mouvement donné, l'ensemble constitue un triple différentiel dont la décomposition des mouvements permet en même temps de développer une force maximale et d'obtenir une répartition isotrope de l'inertie lors des mouvements de la pince quelle que soit la direction du mouvement. Ceci entraîne, lorsque l'opérateur déplacera sa main dans quelque direction que ce soit, que l'effet direct du bras-maitre et de ses moteurs et l'effet indirect par l'intermédiaire de la boucle d'asservissement de l'inertie du bras-esclave et de ses moteurs se traduira par une inertie comparable à celle d'une simple masse.

Cette masse est l'inertie à vide du manipulateur, elle conditionne la vitesse des mouvements et la fatigue de l'opérateur. Par ailleurs, les frottements ont été réduits comme à l'habitude sur tous les manipulateurs maître-esclave.

4. 3 - MOTEURS ET BOUCLE D'ASSERVISSEMENT

Le manipulateur MA 22 a donné lieu à la mise au point de moteurs spéciaux à couple très élevé et inertie réduite, le fort couple utile permet l'usage de réducteurs de faible rapport entraînant en même temps un gain de poids et de prix. Ils utilisent un courant continu de 30 à 40 volts fourni par la batterie du véhicule et sont commandés par l'intermédiaire de la boucle d'asservissement. Il serait à nouveau fastidieux de décrire en détail ce point très important du manipulateur; il est néanmoins nécessaire de préciser le principe de cette boucle d'asservissement: le bras-maitre et le bras-esclave ont leur position constamment mesurée, pour un mouvement donné, par des potentiomètres placés respectivement sur ces bras. Ces potentiomètres sont comparés et le signal d'erreur donne à tout moment la différence de position entre bras-maitre et bras-esclave. Un système d'amplificateur et des réseaux correcteurs qui agissent selon la fréquence des sollicitations font que le moteur du bras-esclave tend constamment à ramener ce bras à la même position que celle du bras-maitre. Ce système est caractérisé par le fait que, pour un couple exercé par le moteur-esclave, il subsiste un signal d'erreur résiduel très faible proportionnel à ce couple. Un système analogue conduit à actionner le moteur du bras-maitre qui, à tout moment, vient normalement résister à l'impulsion provoquée par l'opérateur. L'ensemble est tel que cette résistance est égale à l'effort transmis par le bras-esclave. On reçoit côté maître cet effort additionné des efforts de frottement divers, ce qui nécessite que moteurs et réducteurs soient réalisés avec une très grande précision; ceci explique également qu'on ressent côté maître l'inertie du moteur-esclave. Un système très simple permet de diviser le gain entre signal d'erreur et couple sur le moteur-maitre par un facteur 2 ou 3 permettant ainsi une réduction de l'effort en retour dans ce rapport (ou, en fait, une multiplication de l'effort obtenu au bras-esclave par ce même facteur). Ce dernier point permet de réduire considérablement la fatigue de l'opérateur qui reste tout à fait raisonnable jusqu'à des efforts de l'ordre de 10 à 30 newtons mais devient excessive au-delà pour travailler d'une seule main avec un manipulateur. Evidemment une telle multiplication de l'effort transmis n'est pas réalisable sur les manipulateurs mécaniques qui sont couramment utilisés sur les enceintes

blindées et c'est là un important avantage pour le bras à asservissement électronique.

Le poids total d'un bras est de l'ordre de 60 kg, sa force 150-200 newtons en toute direction, la décomposition des mouvements est telle que le bras étant étendu, il peut appliquer un effort de traction de 600 newtons permettant à ce bras de porter son propre poids. La consommation électrique moyenne est de 300 watts, elle est presque nulle au repos et peut dépasser 500 watts pour le travail le plus dur.

L'électronique propre au bras-esclave se réduit à un prisme de base carrée de 10 cm de côté et d'une longueur de 40 cm, l'électronique est légèrement plus importante sur le côté maître.

On remarquera que le MA 22, par sa compacité, la simplicité de l'électronique-esclave et sa légèreté, présente de nombreux avantages pour le travail en cellule chaude, travail pour lequel on peut placer une paire de bras MA 22 sur tout support télescopique classique.

4. 4 - EFFICACITÉ DES MANIPULATEURS MA 22

Un programme d'essai actuellement encore en cours a été entrepris pour coter la dextérité des différents manipulateurs. Pour cela, on a défini des travaux type qui sont effectués de façon répétitive sous enregistrement permanent et on a comparé la durée d'exécution manuelle à la durée d'exécution au manipulateur. Les premiers chiffres ainsi obtenus permettent de donner l'échelle suivante :

- main nue ; 1,
- manipulateur MA 11 : 2 à 3,
- manipulateur M 8 : 5 à 8,
- manipulateur contrôlé en position sans retour d'effort : 25 environ,
- manipulateur commandé par boîte à boutons (GM 2 T) : 100 à 200.

Le MA 22 doit donner, avec l'électronique de première génération, des temps d'exécution de 3 à 5 fois ceux du travail à main nue et on peut prévoir une amélioration progressive jusqu'au chiffre du MA 11, de 2 à 3 fois. Ces temps tiennent compte en même temps des difficultés dues à la pince du manipulateur qui ne permet pas d'exécuter la tâche de la même façon qu'elle est exécutée par la main. Si l'on disposait d'un engin de préhension plus évolué, on pourrait espérer, dans les meilleurs cas, un temps de travail de 1,5 à 2 fois le temps à la main.

Ceci suppose la réalisation d'un outil terminal beaucoup plus performant que les pinces à deux doigts actuelles, et ne sera possible que dans plusieurs années à l'issue d'autres programmes dont l'aboutissement débouche simultanément vers les applications aux prothèses et vers le perfectionnement des manipulateurs.

5. - DESCRIPTION ET CARACTÉRISTIQUES DU VÉHICULE

On voit sur la figure 8 le véhicule* tel qu'il est réalisé depuis octobre 1972 avec ses batteries et prêt à recevoir manipulateur et dispositif de commande codée.

* Qu'il soit ici permis de remercier et féliciter le personnel de l'atelier délégué par le centre de SACLAY auprès de la Section pour la belle réalisation de ce véhicule dont la structure tout acier inox est néanmoins d'une grande légèreté.

FIG. 8 — Véhicule de VIRGULE à fin 1972

- 1) essieu avant ici rétracté, 2) batteries, 3) essieu arrière pivotant, 4) poignée de commande unique contrôlant la vitesse, la courbure et la direction de la trajectoire

5. 1 - LE MOTEUR-ROUE (fig. 9)

Les moteurs-roues comportent le moteur de propulsion et de braquage directement incorporé sous carter étanche ainsi que l'électronique d'asservissement correspondant à ces deux mouvements. Ces roues sont donc totalement indépendantes et demandent uniquement, outre l'alimentation de puissance, les signaux de commande contrôlant la direction et la vitesse de propulsion. Les très faibles encombrements ont été obtenus à partir de réducteurs jusqu'ici peu connus en France appelés « Harmonic », ne comportant que deux pièces mobiles et une pièce fixe, donnant un couple très élevé dans un très faible volume. Les mêmes réducteurs équipent la jeep lunaire et Lunakod.

En juin 1973 une pré-réduction montée dans les mêmes ensembles a permis à faible vitesse d'obtenir le couple suffisant pour monter les marches d'un escalier à pleine charge et inversement de conserver sur terrain plat une vitesse de l'ordre de 1,5 km/h.

5. 2 - PRINCIPE DE LA GÉOMÉTRIE VARIABLE

L'essieu avant comporte en fait deux bras pivotants similaires pouvant être bloqués dans leurs positions extrêmes à partir d'un verrou télécommandé. On voit sur la figure 9a la roue en position normale; pour la rétracter, elle est préala-

FIG. 9 — Dispositif de géométrie variable

1) essieu proprement dit, 2) axe de pivotement, 3) moteur roue sur bras pivotant, 4) verrou télécommandé.

a) position large, départ de la rétraction, la roue est perpendiculaire au bras, le verrou relâché,
b) fin de la rétraction, le verrou se bloque.

blement placée perpendiculairement au bras pivotant, le verrou étant débloqué, le bras pivote par la seule action de la propulsion de cette roue et le verrou se rebloque automatiquement en fin de course, ces opérations devant être effectuées le véhicule arrêté.

5. 3 - CONTRÔLE DU BRAQUAGE ET DU DÉPLACEMENT

La solution originale employée sur ce véhicule est un calculateur purement mécanique qui coordonne direction et vitesse des différentes roues. Il s'agit d'une application directe des polaires du cercle schématisé figure 10a. Le dispositif de commande consiste en différents potentiomètres directement orientés par des tiges qu'on amène à converger sur un point de commande P. Si l'on asservit les différentes roues du véhicule aux mêmes directions que celles des potentiomètres correspondants, le centre du véhicule sera similaire au point P par une similitude entre la figure formée par les potentiomètres et celle formée par les roues du véhicule. Par contre, si l'on veut faire converger ces dernières roues vers un point éloigné du véhicule, on va les faire converger vers le point O conjugué du point P par

FIG. 10 — Ensemble de coordination des roues

a) schéma de principe, *b)* ensemble expérimental.

- 1) point de commande lié aux mouvements de la poignée, 2) biellettes de commande des roues,
- 3) roues arrière, 4) roues avant fermées, 5) roues avant ouvertes, 6) potentiomètre de direction,
- 7) potentiomètre de vitesse

rapport au cercle circonscrit au véhicule passant par les points de contact de ces roues. Ce point forme avec les extrémités du diamètre passant par P et le point P une division harmonique, et on voit que les différentes demi-droites AO, AP, AM et AN à partir d'une roue A constituant un faisceau harmonique, AM, AN étant perpendiculaires puisque MN est un diamètre, ces dernières sont les bissectrices du faisceau, ce qui revient à constater qu'on obtient la direction de la roue en inversant l'angle du potentiomètre pris entre AP et AM par exemple. Cette transformation très simple permet de faire converger les roues vers l'infini dans la direction du diamètre MN, lorsque le point de commande est au centre du cercle, de le rapprocher jusqu'au point M en déplaçant P du centre jusqu'à M; enfin en cessant de transmettre l'angle renversé pour le transmettre directement, le point O vient jusqu'au centre du cercle et ceci à partir du point de commande P allant du centre jusqu'à l'extrémité du diamètre et retour.

L'ensemble de commande complet comporte de plus la possibilité de faire pivoter le diamètre MN par rapport au véhicule et donne ainsi la possibilité de disposer le centre de rotation en tout point, défini par sa direction et sa distance du centre du véhicule. Les 8 données (4 directions et 4 vitesses) des 4 roues du véhicule sont donc déterminées par ce calculateur géométrique et transmises au véhicule exactement comme on transmet les 7 données d'un télémanipulateur qui sont 7 données de position.

Dans un stade ultérieur, la réalisation sera purement électronique et permettra ainsi la constitution d'un poste de commande de très faible volume, alors que l'ensemble représenté en premier plan de la figure 8 est expérimental.

FIG. 11 — Poignée de commande (modèle expérimental)

- 1) propulsion en avant, 2) rotation à droite, 3) rotation de l'axe général de déplacement en ligne droite 4) référence du véhicule.

Cet ensemble permet à partir d'une seule poignée visible figure 11, comparable à celle du télémanipulateur, de commander le véhicule en vitesse, direction, et rayon de giration.

Dans la réalisation définitive, cette poignée unique de commande sera la poignée même d'un des deux manipulateurs, déconnecté de la télécommande lorsqu'on doit conduire le véhicule. En penchant latéralement sa poignée, l'opérateur réalise l'équivalent de la rotation d'un volant et provoque la création d'une courbure de plus en plus marquée de la trajectoire; lorsque la poignée dans ce pivotement latéral atteint l'horizontale, le véhicule tourne autour de son centre. Un deuxième mouvement de la poignée consiste à pousser cette dernière dans la direction où l'on veut se déplacer (en avant ou en arrière), on obtient une vitesse proportionnelle à cette inclinaison. On voit alors que, lorsque la poignée est horizontale (véhicule pivotant autour de son centre), l'impulsion donnée à cette poignée correspond au sens de rotation du véhicule.

Enfin cette poignée est portée par une potence dont la direction est celle du déplacement rectiligne du véhicule, lorsque la poignée est dans sa position verticale normale. Nous pensons que cette dernière direction sera donnée par le siège du pilote permettant ainsi d'intégrer directement la position relative de cet axe de trajet en ligne droite par rapport au véhicule. On a constaté avec l'ensemble expérimental actuel qu'il est possible de déplacer, au prix d'un temps suffisant, ce véhicule dans des circonstances extrêmement complexes et notamment malgré sa dimension de 0,80 m par 1,40 m, de négocier des déplacements à l'intérieur d'un laboratoire normalement encombré. Enfin, on notera que le véhicule peut se déplacer latéralement et venir prendre pour centre de rotation un point situé devant lui: il pivote alors autour de la zone de travail choisie, exactement comme un opérateur se déplace devant son poste de travail.

6. - DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE COMMUNICATION MULTIPLEX

Cet ensemble doit permettre, d'une part, la transmission de signaux analogiques qui sont les positions de chaque mouvement du manipulateur ou des roues du véhicule, et, d'autre part, un certain nombre de signaux « tout ou rien » nécessaires aux divers auxiliaires et notamment à la commande des différents verrous, supports mobiles, ensembles de télévision etc... Il a été étudié par des élèves de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Electronique et d'Electricité de Paris (E.S.I. E.E.) et transmet sous forme digitale 8×2 canaux analogiques, dont 7×2 pour le contrôle de position des deux manipulateurs et 2 pour l'asservissement d'une caméra ou 8 canaux analogiques pour la propulsion et le braquage du véhicule. Ces canaux permettent par ailleurs la transmission de 96 signaux « tout ou rien ». Dans le sens du retour (véhicule jusqu'au poste de contrôle), on dispose de 16 canaux analogiques dont 2×7 utilisés pour les retours d'effort des manipulateurs, de 64 signaux « tout ou rien » et deux ou trois canaux de télévision.

Un seul bloc étanche placé au-dessus des batteries reçoit le système multiplex, tous les amplificateurs des manipulateurs et les émetteurs-récepteurs. Ce système de télécommande, spécialement étudié pour l'usage sur ce véhicule, comprend

notamment un codage extrêmement sûr où diverses vérifications successives sont effectuées sur les différents messages digitaux. En cas d'arrivée d'un signal erroné, le signal précédent qui a été conservé en mémoire continue à être transmis (ces signaux sont répétés 50 fois par seconde) ; si un deuxième ou un troisième message était erroné, les signaux de position du manipulateur restent fixes, mais le signal de vitesse de l'engin est rejeté et celui-ci s'arrête. Toute coupure de transmission entraîne donc ainsi l'arrêt, sans fausse manœuvre, du véhicule. Nous espérons que la transmission des signaux de télécommande aller et retour s'effectuera sur les mêmes systèmes que la transmission des images de télévision. L'ensemble sera testé, en ce qui concerne le véhicule uniquement, vers juin 1974 sur de très courtes distances, le télémanipulateur sera adapté sur la télécommande digitale d'ici fin 1974.

CONCLUSION

On constatera que le programme de développement de l'engin VIRGULE a maintes applications et qu'il contient, outre l'engin opérationnel visé courant 75, d'une part, un nouveau télémanipulateur d'applications classiques en laboratoires chauds et, d'autre part, diverses acquisitions de connaissances sur l'efficacité de tels engins ; efficacité dans la conduite d'un véhicule radioguidé muni de télévision, dans des zones contenant divers obstacles ou en terrains accidentés ; efficacité de télémanipulateurs maître-esclave selon leurs différents modes de commande, amélioration de ces derniers par perfectionnement de la boucle d'asservissement, amélioration des éléments du terminal mécanique (pinces à plusieurs doigts se rapprochant de la main).

Les difficultés de réalisation d'un véhicule autonome sont par ailleurs source de progrès technologiques très intéressants dans le domaine du rendement électrique des différents matériels, de la réalisation d'une électronique très fiable et très compacte et pouvant même bénéficier de l'usage des piles à combustibles d'ici quelques années. Ici, les applications à l'intervention sous-marine et même spatiale se voient nettement, car les impératifs sont communs à l'intervention en milieu hostile nucléaire, sous-marin et spatial, où l'alimentation en énergie est sévèrement limitée et la fiabilité de l'appareillage particulièrement importante.

On voit alors que les premiers progrès technologiques significatifs pour le véhicule et le télémanipulateur ouvrent un champ nouveau particulièrement important : le travail à l'intérieur des réacteurs. Mis à part les cas extrêmes de réparation liés aux incidents graves, on doit penser aux réparations de routine du futur proche, réparations qui peuvent aller des soudures dans les tuyauteries d'échangeurs jusqu'aux réparations plus importantes tout en respectant des délais serrés, nécessités par le taux de couplage au réseau de plus en plus élevé attendu des Centrales Nucléaires. Les Centrales conventionnelles dont le nombre de pannes est similaire ont jusqu'ici un délai de réparation extrêmement court comparé à celui des Centrales Nucléaires. Il y a là un domaine particulièrement important pour le développement d'engins nouveaux qui peuvent dériver de l'engin VIRGULE actuellement en cours de réalisation.

REMERCIEMENTS

Ont activement coopérés à ce programme :

- MM. COLLOMBAT, DEBRIE, GERMOND, GRENIER, GRYPARIS, GUILBAUD, DE MONTAIGNAC, RICHE et RIGAUT de la section E.M.H.,
- Le personnel de l'atelier rattaché sous la direction de MM. MARCHAL et GRE,
- Neuf élèves de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs (E.S.I.E.E.) de Paris,
- MM. GLACHET et FRANÇOIS (Société La Calhene),
- M. CORFA (Société Seri),
- M. Carl FLATEAU (Teleoperator Systems - U.S.A.),

Qu'ils soient remerciés de leur contribution.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GRENON, M., *Le travail en milieu hostile*, Presses universitaires de France, Paris.
- [2] JOHNSON, E.G., CORLISS, W.R., *Teleoperators and human augmentation*, NASA SP 5047, NASA Technology Utilization Office (1967).
- [3] KNOCKAERT, A., TESTE DU BAILLER, A., *Peacefull use of atomic Energy 1972*, mémoire 811-vol. 2.
- [4] HOMER G.B. « Mobile manipulator systems », Proc. 14th Conf. Remote Systems Technology (Pittsburgh), ANS (1966) 129.
- [5] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE. Etude et équipement des laboratoires de haute activité ; Problèmes de sécurité, Coll. Sécurité, n° 30, AIEA, Vienne (1969) 105.
- [6] SAMSEL G., VAANE J., de RAS E. « Trois ans d'expérience dans la manipulation de plutonium, d'américium et de curium irradiés », *Radiation Safety in Hot Facilities* (C.R. Coll. Saclay, 1969), AIEA, Vienne (1970) 497.
- [7] BOURDREZ J., MARQUE Y., ROGER B., BERTRAND R., PERONNET L. « Démantèlement des cellules de haute activité et décontamination en atelier de leurs équipements », *Ibid.* p. 575.
- [8] KISSEL Ph., MARQUE Y., VERTUT J. « Les moyens d'intervention du CEA en cas d'accident nucléaire à l'extérieur de ses établissements », Proc. 2nd IRPA Congress (Brighton, 1970) IRPA/2/P237.
- [9] HUNT C., LINN F.C. « The Beetle, A mobile shielded cab with manipulators », Proc. 10th Conf. Hot Laboratories and Equipment (Washington, D.C.), ANS (1962) 167.
- [10] VERTUT J. « New types of heavy manipulators », Proc. 10th Conf. Hot Laboratories and Equipment (Washington, D.C.), ANS (1962) 185.
- [11] CLARK J.W. « The Mobot II remote handling system », Proc. 9th Conf. Hot Laboratories and Equipment (Chicago), ANS (1961) 111.
- [12] KLEINWATCHER H. « Technical description of Syntelmann, Rapport Q 320, Lorrach, Rép. féd. d'Allemagne (1970).
- [13] VERTUT J., GUILBAUD J.P., KITTEL Ph. *Les engins d'intervention en milieu radioactif - Peacefull use of atomic Energy 1972* mémoire 617, vol. II, p. 161.
- [14] VERTUT J. and Al. « MA 22 compact bilateral servo raster slave manipulator », Proc. 20th conference on remote Systems Technology, ANS, 1972, 256.
- [15] VERTUT J. and Al. « Variable Geometry wheeled teleoperator » Proc. 20th conference on remote Systems Technology, ANS, 1972, 303.