Zeitschrift: Revue syndicale suisse : organe de l'Union syndicale suisse

Herausgeber: Union syndicale suisse

Band: 63 (1971)

Heft: 2

Artikel: L'association des performances de l'ordinateur électronique et de génie de l'homme dans l'exploration spatiale

Autor: Hartmann, Georges

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-385618

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: 15.07.2025

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

L'association des performances de l'ordinateur électronique et du génie de l'homme dans l'exploration spatiale

Par Georges Hartmann,
docteur en sciences économiques, chargé de cours pour l'informatique à la Faculté de Droit et des Sciences économiques et sociales de l'Université de Fribourg.

«En 1980, un ordinateur sera mille fois plus petit qu'aujourd'hui pour les mêmes opérations et chaque opération coûtera deux cents fois moins.»
(William Knox, conseiller spécial du président des EU, 1967)

«Avant 1980, il faudra que les responsables politiques en aient maîtrisé les implications.»
(Servan-Schreiber, 1969)

1. Introduction

Les objectifs de mon voyage aux Etats-Unis, en avril 1970, ne furent pas seulement d'étudier les centres spatiaux terrestres de la NASA[1]. Ils se sont encore étendus à l'examen et à l'analyse du rôle des ordinateurs électroniques aux différents niveaux de traitement de l'information dans tous les processus de la préparation, de la poursuite et du contrôle des missions spatiales.
Ce n'est un secret pour personne qu'une grande société américaine de production d'ordinateurs électroniques domine actuellement le marché mondial à raison de plus de 80% des installations utilisées. Mais ce que beaucoup ignorent ou veulent ignorer, c'est qu'en établissant le rapport existant entre le nombre d'ordinateurs électroniques dans chaque pays et la population de ce pays (faute de pouvoir procéder au même calcul sur la base de la population active seulement), on constate que *la Suisse dispose de la plus grande densité d'ordinateurs électroniques en Europe,* par million d'habitants, avant la Suède, l'Allemagne, la France; elle figure même au second rang dans le monde, immédiatement après les Etats-Unis.
Après vingt-cinq ans seulement d'évolution et de progrès techniques dans la conception et dans la miniaturisation des composants des ordinateurs électroniques, ces derniers, manifestant toujours plus

[1] Georges Hartmann: L'exploration spatiale: symbole d'avance de la science et de création d'emplois, *Revue syndicale*, octobre et novembre 1970.

leur présence et leurs performances, ne font plus leurs tout premiers pas dans cette immense aventure[2]. On attribue déjà, dans les milieux industriels, le plus de chances de développement à la branche de l'électronique qui procède aux premiers essais d'utilisation de l'électronique dite «moléculaire» pour abaisser encore plus le volume et le poids d'installations de tous genres ainsi que leurs coûts de production, installations parmi lesquelles figurent les ordinateurs électroniques, instruments de la science en développement de l'information.

En effet, la société économique moderne s'organise autour du phénomène informatique. Une colossale transformation de la civilisation humaine se prépare et l'ordinateur électronique est un des ferments de cette métamorphose dont l'action libératrice s'étendra toujours plus aux travaux répétitifs et monotones qu'il n'est pas digne de confier à des travailleurs humains.

Clef de voûte de beaucoup de problèmes d'aujourd'hui et de la majorité de ceux de demain, l'ordinateur électronique conduira les pays industriels à utiliser toujours plus cette technique extraordinairement ingénieuse *pour calculer, prévoir et décider mieux et plus vite qu'auparavant.*

Etant donné la croissance surprenante des réalisations dans le domaine du traitement électronique de l'information tant en Europe qu'aux Etats-Unis, soit «en temps réel» (Real Time), «en partage du temps» par plusieurs utilisateurs simultanément (Time Sharing) et «à distance» (Teleprocessing), on estime aux Etats-Unis qu'en 1975 au moins 60% des ordinateurs seront reliés en télégestion (Teleprocessing), c'est-à-dire qu'un gros ordinateur central sera utilisé pour quantité de disciplines techniques, industrielles, commerciales, administratives depuis une multitude de postes terminaux d'interrogation situés'même à des milliers de kilomètres. Par exemple, l'«American Telegraph and Telephon» a évalué qu'aux Etats-Unis, au cours de la décennie commencée, des dialogues entre ordinateurs eux-mêmes sur la base de programmations particulières utiliseront beaucoup plus de lignes de téléphone, de télex ou de faisceaux laser (faisceau de lumière cohérente comme support de transmissions de messages) à longue distance que les communications entre individus.

De nombreuses applications, dans ces divers domaines, qui auront évidemment *toujours plus d'incidences sur la production, les échanges commerciaux, les emplois, les coûts, les salaires et les prix,* sont déjà connues: la simulation de phénomènes scientifiques et techniques en laboratoire, l'apparition grandissante des cotations instantannées

[2] Georges Hartmann: Tout pronostic technique devrait être accompagné d'une planification économique et sociale, *Revue syndicale,* mars 1968.

des valeurs boursières de New York dans les plus grandes banques du monde entier, la réservation des places dans les grandes sociétés de navigation aérienne américaines, japonaises, européennes et dans les grandes compagnies ferroviaires (par exemple pour le TEE en Europe), la gestion des stocks de matières premières ou de matériaux, l'enseignement programmé dans les grandes écoles et dans les universités, etc.; *le guidage des fusées spatiales et la poursuite des engins spatiaux est aussi de leur nombre.*
On comprendra mieux pourquoi et comment l'industrie des ordinateurs électroniques n'aurait jamais pris une si grande avance sans les impératifs de l'exploration spatiale, depuis les nécessités de la conception et de la préparation de millions de pièces et d'appareils jusqu'à la poursuite et à la récupération des engins spatiaux, pilotés ou non, ainsi qu'aux analyses des résultats de la recherche spatiale.

2. Le rôle des ordinateurs électroniques dans la préparation des missions spatiales

Se déplacer de quelques centaines de kilomètres horizontalement entre deux points terrestres ou verticalement entre la Terre et une orbite de satellite artificiel n'implique pas les mêmes exigences. Pour se déplacer à la verticale et atteindre un milieu entièrement différent, l'homme a dû imaginer de nouvelles formes de pensée, de calcul, d'action et inventer de nouveaux engins, en un mot, procéder à une véritable révolution intellectuelle. Ainsi que le soulignait le 5 février 1969 à Paris le colonel Frank Borman, chef de bord d'Apollo 8 (décembre 1968), «Jules Verne avait prévu tout à la fois la merveilleuse aventure que vient de connaître l'humanité et ses détails les plus précis, comme le lancement du vaisseau spatial à partir de la Floride et son amerissage dans le Pacifique... C'est là un témoignage de génie». Mais le témoignage de génie est combien plus grand de la part de tous ceux qui ont conçu et réalisé cette «merveilleuse aventure».
J'ai déjà précisé ailleurs que tout programme spatial implique des conditions de base sans lesquelles aucune expérience spatiale n'est possible. *Il faut disposer d'une industrie métallurgique avancée, d'une industrie électronique d'avant-garde, de rampes de lancement, de fusées, de satellites, d'équipages formés au sol et en vol, ainsi que d'un immense réseau de poursuite*. L'URSS, les EU et la Chine sont les trois seules nations ayant ce monopole. Comme l'écrivait fort judicieusement Pierre Mendès-France «les firmes moyennes peuvent difficilement accomplir de réelles performances lorsque l'exécution de programmes complexes requiert l'intervention de groupes et d'équipes diversifiés. La première traversée aérienne de l'Atlantique a été l'œuvre quasi artisanale et sportive d'un individu presque seul;

rien de comparable n'était plus possible lorsqu'il s'est agi, un demi-siècle plus tard, d'accomplir le voyage sur la lune, car l'entreprise demandait de nombreuses équipes de techniciens unissant leurs connaissances et intégrant leurs efforts pour atteindre un résultat situé bien au-delà des possibilités d'un savant ou d'un ingénieur isolé ou de quelques savants et ingénieurs, fussent-ils géniaux.» La phrase suivante «La vie des astronautes dépend de vous» est le texte dont sont rédigées les affiches qui, dans tous les ateliers et usines des Etats-Unis travaillant pour l'Espace, s'adressent aux ingénieurs, techniciens et ouvriers.
Mais on a aussi coutume de dire qu'il n'y aurait pas eu d'âge de l'Espace sans les mathématiques et les énergies de propulsion des fusées, sans le courage et la maîtrise des astronautes. Cela est exact, mais l'affirmation est incomplète. *Il n'y aurait pas non plus eu d'âge de l'Espace* sans Torricelli et les expérimentations du vide (thermomètre, baromètre, lampes radio, tubes des écrans TV), sans Branly, Hertz et Marconi et la diffusion des ondes (radio, repérage, guidage), sans l'électronique (radars, ordinateurs). Sait-on, par exemple, que 88% des 290 t d'une fusée Saturne 5 surmontée de sa cabine Apollo sont constitués par des installations électroniques? Les installations de plus en plus perfectionnées que réclament des opérations de plus en plus complexes avant, pendant et après les missions spatiales pourraient donner l'illusion d'être immatérielles parce qu'elles sont commandées automatiquement à distance par des moyens physiques invisibles (ondes radio, ondes TV, radars, circuits électroniques des ordinateurs, etc.). Calculs préalables, traitement des paramètres préenregistrés et des télémesures *se ramènent finalement à des problèmes* de cybernétique, de régulation, de stochastique *qu'on ne peut résoudre qu'avec des ordinateurs électroniques.* C'est donc souligner l'importance primaire des ordinateurs *dans toute la chaîne des activités industrielles et des opérations scientifiques* qui ont permis l'accomplissement et la précision des vols spatiaux, des alunissages, des retours et des récupérations d'engins tant pilotés que non habités.
Dans la recherche spatiale, chacun de tous les éléments des programmes spatiaux à réaliser, depuis la conception et la fabrication des installations et des engins nécessaires jusqu'à la récupération des hommes et des équipements, fait partie d'un système. Pour s'assurer que rien ne soit oublié, que chaque élément prévu soit à sa place, que chaque chose et chaque homme remplissent le rôle assigné depuis le laboratoire et l'usine à la rampe de lancement et aux radars et bateaux du réseaux de récupération, il faut, malgré une myriade de facteurs inconnus et d'impondérables, établir *un immense programme et une multitude de sous-programmes* (dénommés «analyse de systèmes» dans la gestion moderne des entreprises) dont le déroulement a dû être fixé dans les limites d'un

budget déterminé. Mais tout cela n'est rendu possible que par des ordinateurs électroniques. «La technique spatiale reste le fer de lance du progrès, mais ni fer ni lance ne se fabriquent plus sans automatisme ni ordinateur. L'informatique règne sur tous les plans de la société: science, économie, industrie, gouvernement» (Georges Elgozy). Si l'on admet que l'industrie des ordinateurs n'aurait jamais gagné une si grande avance sans les impératifs de l'exploration spatiale, celle-ci, réciproquement, n'aurait jamais été possible sans les ordinateurs numériques et analogiques capables de permettre la mise sur orbite et le contrôle du déplacement de satellites parcourant plus de 10 mètres en un millième de seconde (11 km/sec.). En effet, puisqu'il y a toujours au moins cinq types de problèmes à résoudre, soit la collecte, la transformation, la mémorisation, le transfert et la communication des informations et des résultats chiffrés ou codés, on comprend que l'exploration spatiale et en particulier la liaison terrestre permanente avec les satellites sur orbite dépendent des ordinateurs électroniques grâce à l'extraordinaire rapidité de leur fonctionnement (débit de millions de calculs à la seconde), à leur prodigieuse capacité de stockage et de mémorisation des chiffres (des milliards) et aux possibilités infinies d'assimilation, d'intégration et de coordination de toutes les informations et données entre les différentes installations électroniques, dépassant en cela les capacités des plus grands cerveaux humains. Or, toutes les opérations nécessaires doivent être effectuées aussi bien en «temps différé», c'est-à-dire après l'événement, et en «temps réel», c'est-à-dire au moment où se produit l'événement, qu'en «traitement simultané» et en «télétraitement», c'est-à-dire à grande distance pour des événements qui se présentent en même temps que d'autres événements: tout le monde pense immédiatement, dans le domaine de l'exploration spatiale, à la simulation, au contrôle de lancement de la fusée, à son guidage, aux télémesures, à la poursuite du satellite sur son orbite, aux corrections d'orbite, etc. Tout revient à appliquer des méthodes d'optimisation au moyen d'ordinateurs électroniques. «Il y a tellement de façons de placer douze personnes autour d'une table qu'une maîtresse de maison qui voudrait consacrer 10 secondes à réfléchir sur chacune d'elle mettrait 150 ans pour régler le problème.» Même si l'on comprend facilement cette déclaration de Louis Armand, on a cependant peine à s'imaginer l'ampleur et la complexité des calculs qui doivent être mis en œuvre pour réussir toutes les réalisations de la longue chaîne d'activités scientifiques, techniques et industrielles qui doit aboutir aux missions spatiales: dans des dizaines de milliers d'entreprises des milliers d'ordinateurs électroniques calculent, à des niveaux différents de la complexité scientifique et technique, tout ce qui se traduira finalement dans la plus grande efficacité de l'exploration spatiale.

L'ordinateur électronique est apparu d'abord au niveau de l'enseignement et de la formation des savants, des ingénieurs, des techniciens travaillant indirectement pour l'exploration spatiale, par le truchement des entreprises sous-traitantes, et directement par leur engagement vis-à-vis de la NASA.
L'ordinateur a joué son rôle indispensable pour la conception de tous les éléments commandés par la NASA aux entreprises industrielles, pour la recherche opérationnelle et la préparation des décisions des dirigeants de ces entreprises ainsi que dans l'utilisation des techniques PERT et de simulation de phénomènes scientifiques et techniques en laboratoire (formes, grandeurs, résistances, performances, coût, rentabilité, etc.): par exemple pour la gestion prévisionnelle ou les études de marchés d'une entreprise comme aussi pour la mise au point d'un produit ou d'un élément d'installation, la «simulation de modèles» permet à l'ordinateur, par le biais de méthodes purement mathématiques, de comprimer dans un intervalle de quelques minutes des années d'existence théorique de cette entreprise ou de ce produit ou de cette machine à l'étude, en tenant compte de toutes les variations possibles de certains de leurs paramètres.
Les ordinateurs électroniques ont été indispensables, dans cette longue chaîne qui conduit à la NASA, *pour la gestion des stocks des entreprises sous-traitantes comme aussi pour celle des stocks de matériels de la NASA, dans la commande numérique des laminoirs et des machines-outils* (80% des pièces sont usinées de cette manière), *dans le contrôle des processus de production des produits solides et liquides* (carburants, lubrifiants, etc.), *dans les contrôles de qualité, dans l'établissement des dessins et des graphiques,* et, au niveau même de la NASA, dans l'automatisation *des activités administratives* (comptabilité, factures, paiements, salaires, etc.), tout cela au travers de milliards d'équations dépassant les capacités de calculs des hommes les plus géniaux.
Tous les programmes pour ordinateurs, mis au point tant par la NASA que par ses vingt mille sous-traitants, sont conservés, complétés, classés par COSMIC, le «Computer Software Management and Information Center» que la NASA a créé et dont elle a confié l'administration à l'Université de Géorgie: plus de 14 000 demandes ont déjà été présentées par *des utilisateurs* de l'industrie, du commerce et des universités, qui grâce à ces programmes préfabriqués *gagnent du temps et de l'argent.*
L'astronautique est incontestablement un immense banc d'essai pour les applications les plus diverses de l'ordinateur électronique utilisé aussi bien en temps différé qu'en temps réel et en téléinformatique. D'abord, *des ordinateurs exploités en temps différé ont pour mission de concevoir, de préparer, de calculer les cheminements de vol, les trajectoires des engins qui seront lancés:* de la même

manière que pour un tir balistique, la NASA doit inclure dans ses calculs des équations comportant une quantité innombrable de paramètres tels que par exemple l'énergie nécessaire à la propulsion au départ et en vol, la résistance de chacune des milliers de parties des engins, l'angle de lancement, la vitesse de départ, les altitudes en des temps prédéterminés, les accélérations, les décélérations, l'angle de rentrée dans l'atmosphère, la vitesse de rotation de la Terre sur elle-même et celle de sa course autour du Soleil, etc.: ainsi, il y a quelques années, après avoir reçu plus d'un millier d'instructions, un ordinateur de l'époque calculait de telles trajectoires en 2 minutes après plus d'un million d'opérations. Ensuite, avant d'aller dans le ciel il faut faire semblant; autrement dit il faut procéder à une répétition générale avant le vol: au «Marshall Space Flight Center» de Huntsville, le programme d'un ordinateur électronique est dirigé par une bande magnétique qui enregistre 50000 instructions pour le lancement des fusées. Ainsi au moyen de milliers de lancements et de vols fictifs simulés en quelques minutes *par ordinateur électronique*, les spécialistes de la NASA sont à même de *constater comment des changements dans la construction des fusées pourraient réagir lors d'un lancement réel:* ce que l'ordinateur calcule et vérifie en une minute exigerait 8 ans de travail à un homme, soit un million de fois plus longtemps, ce qui rendrait par conséquent impossible tout vol spatial. C'est ainsi que le maximum d'accidents de parcours et de pannes possibles avaient été envisagés pour un sauvetage d'Apollo 13 déjà avant son lancement. Parmi les 83 bâtiments du «Manned Space Flight Center» de Houston, il en est un dans lequel se trouvent uniquement les installations de simulation de mission et d'entraînement des équipages, tandis qu'un autre bâtiment abrite le Centre de traitement électronique des informations. On ignore souvent que parmi les agressions physiques et physiologiques auxquelles sont soumis les astronautes, l'apesanteur, la solitude, la quasi-immobilité, l'isolement sensoriel peuvent être reproduites artificiellement en laboratoire et simulées pour permettre d'étudier les réactions des astronautes. Au «Kennedy Space Center», les tests que les astronautes doivent subir dans le simulateur de vol, qui n'est pas autre chose qu'un *ordinateur électronique en liaison avec une cabine fixe de pilotage,* doivent montrer s'ils sont aptes à piloter un satellite artificiel et si leur préparation technique, physique et psychique est suffisamment complète pour qu'ils puissent opérer toutes les manœuvres nécessaires prévues par les programmes d'aller et de retour de l'engin spatial.
De même que les allumettes ne servent qu'une fois, une fusée ne fonctionne en fait qu'une seule fois malgré les nombreux contrôles qui se sont succédés en usine avant l'assemblage de tous les éléments de chaque étage, puis après le montage des trois étages dans le VAB de Cap Kennedy et enfin lors du test final sur la rampe

de lancement. Même à ce dernier niveau tout le complexe électronique et automatique du «simulateur d'engin» doit répondre aux ordres des divers systèmes programmés de télémesure, de télécommande, de poursuite, etc.
Puis, si le système ESE (Electric Support Equipement) *contrôle au moyen d'ordinateurs électroniques le montage et le fonctionnement des fusées* sur la base de milliers de tests et de simulations de pannes possibles, c'est encore à Cap Kennedy qu'*un ordinateur géant contrôle les opérations de lancement,* fournissant toutes les deux secondes les résultats d'analyses de quelque 70 000 informations chiffrées qu'il reçoit et traite par seconde. Par exemple, le seul compte à rebours, avant la mise à feu, nécessite plus de deux cents mesures qui doivent être conservées pour les analyses ultérieures et la fusée Saturne 5 en vol totalisera ensuite six systèmes télémétriques pour le premier étage, trois pour le second, quatre pour l'instrumentation et trois pour la charge utile, tous ces systèmes étant décomposés chacun en des milliers de mesures.

3. Le rôle des ordinateurs électroniques dans la poursuite et le contrôle des vols spatiaux

Aux trois quarts de sa hauteur, dans le troisième étage, la fusée comporte une unité de 7 m de diamètre (épousant la forme annulaire du corps de la fusée) et d'environ 2 m de haut (Instrument Unit) contenant *un ordinateur électronique de vol qui travaille en temps réel* et constitue avec une centaine d'autres dispositifs le système complet de calcul, de commande et de navigation *pour suivre à pas pas la trajectoire réelle en l'ajustant* au fur et à mesure à une trajectoire théorique calculée d'avance et enregistrée dans sa mémoire.
Ce n'est que lorsque le troisième étage de la fusée en vol a abandonné sa course et que le module de commande ou *satellite a été placé sur orbite que son propre ordinateur électronique,* en faisant apparaître au tableau de bord les données de position et les résultats des calculs de route en chiffres lumineux, calcule les nombreuses manœuvres à opérer à tel moment et en tel lieu pour obtenir les effets imposés par le programme préalable incorporé dans le système de calcul de l'ordinateur (par exemple accélérations, changements d'orbite, décélérations, arrimages, rendez-vous orbitaux, etc.). Il est évident que les engins spatiaux doivent être encore dotés de récepteur-émetteur radio-TV doublé d'un enregistreur pour que puissent être assurées les liaisons de télémesures: l'ordinateur électronique opérera en accord avec ces installations de télécommunications ou bien en temps réel si le satellite est piloté ou bien en temps différé s'il n'est pas piloté afin de procéder au déclenche-

ment automatique de l'émission lors du passage du satellite au-dessus des stations réceptrices radio ou TV terrestres.
En plus de son radar de rendez-vous (56 dm^3, 32 kg, détection de la cible à une distance de 400 km), le satellite Gemini disposait d'un ordinateur électronique de 27 kg et consommant 95 W, capable de mémoriser 160 000 informations élémentaires (donc des milliers d'instructions) et d'effectuer en une seconde 700 additions, 250 multiplications et 120 divisions. Les ordinateurs des satellites Apollo furent perfectionnés: pesant 25 kg et consommant 100 W ils pouvaient calculer à l'avance toutes les positions possibles sur la base de sept coordonnées, permettant ainsi aux astronautes de prendre une décision immédiate au fur et à mesure des besoins. Les astronautes peuvent aussi diriger leurs manœuvres d'après les informations reçues en permanence du centre spatial terrestre et mettre l'ordinateur hors service. Ils peuvent encore être libérés de leur tâche lorsque l'ordinateur opère seul d'après les informations reçues du centre spatial ou d'après celles du radar et des détecteurs de bord, comme ce fut le cas par exemple lors de l'alunissage automatique de l'engin non piloté Surveyor 6 en 1967 ou du module lunaire LEM piloté d'Apollo 12 en 1969 ou de l'engin non piloté Luna 16 en 1970. Dans cette dernière méthode, l'ordinateur compare en permanence les informations détectées par ses instruments auxiliaires avec celles du programme enregistré préalablement dans sa mémoire électronique: c'est de la même manière que sont réalisées sur orbite ou sur la Lune des opérations automatiques apparemment impossibles (braquage de caméras photo-TV, prises de vues, développement de pellicules de film et retransmission TV, prélèvement de matériaux géologiques, etc.).
Mais cela ne libère pas pour autant les centres spatiaux d'observer, de calculer et de poursuivre en permanence chaque satellite jusqu'à ce qu'il ait accompli sa mission. C'est là qu'apparaît l'étroite collaboration entre les installations de bord et celles des centres spatiaux. On le comprend d'autant mieux si l'on rappelle que, pour un astronaute, le délai qui s'écoule entre la perception visuelle à bord ou la perception acoustique d'une information reçue du centre spatial, l'excitation de la rétine ou du nerf auditif, leur transmission au cerveau, la réalité de l'image ou du son, le déclenchement des réflexes nerveux et des muscles, l'exécution de la manœuvre nécessaire et le délai de réponse de l'appareil ainsi que le déclenchement de sa manœuvre, équivalent à un parcours de 24 km dans l'espace pour un satellite se déplaçant à environ 11 km par seconde. C'est pourquoi, et étant donné qu'il n'y a dans l'espace ni verticale ni horizontale ni boussole, le satellite est dirigé sur sa trajectoire par les combinaisons complexes d'une chaîne de télécommande et de navigation par inertie. Le navigateur inertiel est indispensable comme appareil de mesure des efforts appliqués à l'engin spatial

dans le but de corriger sa trajectoire ou son atterissage automatique et comme repère d'attitude: les détecteurs des variations de vitesses dues aux poussées arrière (accéléromètres) et des changements de direction dus aux poussées latérales (trois gyroscopes dont l'axe reste invariable dans l'espace) permettent à l'*ordinateur de bord ou,* par télémétrie à *celui du centre spatial,* de calculer et de déduire à chaque instant les distances parcourues. Ces calculs sont complétés, pour faire le point, obligatoirement par des observations astronomiques successives prenant pour repère une étoile brillante et suffisamment éloignée pour qu'elle reste fixe par rapports aux corps célestes mouvants et voisins du satellite. Ces opérations peuvent aussi se dérouler automatiquement: un senseur solaire recherche le soleil et se bloque sur lui; un senseur stellaire tourne autour de la direction satellite–soleil jusqu'à ce qu'il ait détecté l'étoile voulue: la mesure des angles formés par cette étoile, le satellite et le soleil puis par cette étoile, le satellite et la planète vers lequel l'engin spatial se dirige ainsi que la recherche des distances sont effectuées ou bien par les astronautes (tables astronomiques) ou bien par l'ordinateur de bord (programme).
Lors de l'alunissage du LEM d'Apollo 11 et 12 en juillet 1969 (Armstrong et Aldrin) et en novembre 1969 (Conrad et Bean) l'*ordinateur électronique du LEM* a été branché 30 secondes avant l'alunissage:

- sur le contrôle d'altitude,
- sur le déclencheur automatique de la mise à feu du moteur de correction pour le cas où le LEM aurait basculé,
- sur la prise en charge automatique des systèmes de navigation et de secours si un incident ou une anomalie s'était produit.

A son tour, capable d'élaborer les signaux de commande des petits moteurs de pilotage et du gros moteur de propulsion, l'*ordinateur électronique de cabine* (Apollo 11 et 12):

- contenait en mémoire tous les programmes possibles nécessaires pour l'accomplissement d'une mission aller et retour Terre–Lune: ce programme représente le résultat du raisonnement de centaines d'experts scientifiques de toutes les disciplines pendant plusieurs années,
- analysait les conditions fournies par plus de cent cinquante mesures enregistrées en permanence et permettant d'amener le véhicule spatial en un point donné avec une vitesse donnée grâce aux accéléromètres mesurant les forces appliquées à l'engin spatial (guidage),
- déterminait la position et la vitesse du véhicule spatial au moyen de visées sur étoile ou sur horizon, sur repère terrestre, réception radio d'une station terrestre ou par radar (navigation),

- commandait l'orientation de l'engin comme sur des «rails immatériels» au moyen de gyroscope et de visée sur étoile (pilotage).

Cet ordinateur électronique, dont dépendaient tant la réussite de la mission que la vie des cosmonautes, et se présentant comme plus complexe que pour les autres vols:

- pesait 200 kg avec un volume de 1,2 m^3,
- comportait un clavier de dix-neuf touches et de quelques manettes,
- fondait ses calculs sur plus de cent cinquante mesures enregistrées en permanence,
- calculait à la vitesse de plus de sept mille opérations par seconde (= Gemini),
- affichait les résultats de ses calculs en chiffres lumineux au-dessus du clavier,
- signalait par un voyant lumineux les erreurs de manipulations des cosmonautes et les incidents éventuels,
- transmettait automatiquement en même temps (temps réel = 1sec. pour le cheminement des ondes radio) aux stations terrestres de contrôle du vol toutes les informations enregistrées, reçues et traitées pour que ces stations puissent, en une fraction de seconde, *faire procéder par d'autres ordinateurs électroniques* aux calculs de corrections nécessaires et de les transmettre à la cabine Apollo.

On sait que les opérations intellectuelles et physiques d'un chasseur qui tire sur une cible mouvante, un gibier, se ramènent à repérer l'animal, estimer son mouvement et sa vitesse de déplacement, calculer où sera ce but dans l'instant d'après, viser dans cette direction, tirer, observer les écarts de visée, corriger la visée selon ces écarts et tirer de nouveau. De même que la DCA des armées modernes ou les réseaux radars de surveillance aérienne du territoire (NORAD en Amérique du Nord, SAGE aux Etats-Unis, SAC pour l'OTAN, STRIDA en France, Florida en Suisse...) qui assument automatiquement les mêmes opérations cybernétiques que celles du chasseur de gibier, le repérage et la poursuite des engins spatiaux ne sont possibles qu'avec les radars et les satellites de télécommunications, seuls moyens rapides de détection par échos. Dans un système d'exploration spatiale, où les choix et la préparation des décisions sont effectués par des installations automatiques, on comprend facilement que ces dernières *impliquent une immense infrastructure technique et électronique de localisation et de poursuite* tenant compte du fait que la portée d'un seul radar est limitée en raison tant de l'émission en ligne droite de son faisceau d'ondes que de la courbure de la Terre, d'où la nécessité d'installer un chapelet de radars sur le pourtour de la Terre.

Il a été dit que les satellites artificiels, pilotés ou non pilotés, ne sont pas autonomes et qu'ils dépendent en quelque sorte de leurs liaisons avec la Terre. Les centres spatiaux de la NASA doivent en effet observer et poursuivre en permanence chaque satellite jusqu'à ce qu'il ait accompli sa mission. Cette tâche implique l'existence d'une organisation immense au niveau planétaire.
Comme le faisceau lumineux d'un projecteur dirigé sur un obstacle est renvoyé partiellement par ce dernier vers la source de lumière (écho), l'évaluation directe de la vitesse de l'engin spatial à l'approche du corps céleste à l'aller ou au retour sur la Terre est obtenue grâce au radar (Radio Detection and Ranging – détection et mesure de la distance par radio) qui émet un faisceau d'ondes électromagnétiques à haute fréquence sous forme d'impulsions séquentielles, ces ondes étant réfléchies par l'obstacle qu'elles rencontrent et renvoyées vers le radar: la durée du retour de l'écho-radar permet de calculer la distance et la vitesse de déplacement de l'engin spatial. On sait que pour détecter des objets au radar, celui-ci doit émettre par son antenne des impulsions électromagnétiques à très haute fréquence et très brèves qui se propagent à la vitesse constante de la lumière (300 000 km/heure). Ces impulsions sont partiellement réfléchies par les corps rencontrés et l'intervalle de temps qui s'écoule entre le moment où les impulsions ont été émises et le moment où elles sont reçues après réflexion constitue la mesure de la distance séparant le radar de l'obstacle qui a donné naissance à l'écho.
Ainsi, en supposant que l'engin spatial doive atteindre un point à 350 000 km de la Terre et que pour cela on communique à la fusée porteuse une vitesse voisine de 11 km/sec avec une erreur de 1 mètre à la seconde au départ, l'engin spatial manquera sa cible de quelque 10 000 km et devra corriger sa route au prix d'une impulsion donnée par un de ses moteurs en un point de son orbite initiale en se transférant sur une nouvelle trajectoire passant à proximité du point visé au moment du départ, tous les paramètres de la nouvelle trajectoire et toutes les corrections étant calculés par les stations terrestres de poursuite et de contrôle.
En effet, une fois sur sa trajectoire l'entraînant loin de la Terre, l'engin spatial doit être suivi par les stations au sol qui déterminent, lors des liaisons, trois paramètres: d'abord le temps que met un signal pour effectuer le trajet Terre–engin–Terre, ce qui in diquela distance; puis le glissement de fréquence dans les émissions-radio de l'engin spatial, ce qui indique la vitesse radiale; enfin la position du véhicule dans l'espace. Pour préciser ce qu'est la vitesse radiale, il est peut-être utile de rappeler qu'elle est le produit des mouvements relatifs déterminés par «l'effet Doppler», du nom du physicien autrichien Christian-Johann Doppler qui découvrit ce phénomène vers le milieu du XIXe siècle: lorsqu'un avion ou un

train approche d'un observateur il entre dans l'oreille de cet observateur plus d'ondes sonores par seconde (raccourcissement de la longueur d'onde et sifflement aigu) que lorsque l'avion ou le train a dépassé l'observateur et s'éloigne de lui, l'oreille de ce dernier enregistrant cette fois moins d'ondes sonores par seconde (rallongement de la longueur d'onde et baisse de la hauteur du son ou du sifflement); ce décalage ou ce glissement de la fréquence proportionnellement à la vitesse de la source est autant valable en optique (astronomie) qu'en acoustique. Et la performance des *ordinateurs électroniques* est telle qu'ils *sont capables,* avec les deux premières paramètres, de calculer le troisième, soit *par exemple de connaître à 30 m près la position de l'engin spatial à 400 000 km de la Terre.*

Près de Colorado Springs (Colorado), le Centre de défense spatial des Etats-Unis suit dans l'espace la marche de chaque engin lancé de la terre: ce qu'il est, où il était auparavant, où il va, jusqu'au moment de sa mort spatiale. Ce centre reçoit environ 100 000 relevés de repérage par jour, traités par ordinateurs électroniques: les analystes qui en étudient les résultats sont à l'affût de la plus légère déviation, prévoyant aussi, en les localisant, les retours d'engins spatiaux ou des parties d'engins spatiaux. Tout lancement de satellite artificiel nécessite, parallèlement au centre de Colorado Springs, l'existence d'un immense réseau de poursuite et de traquage des véhicules de l'espace, capable de repérer et d'observer la position d'un engin à 1 mètre près et de contrôler la trajectoire prévue; selon les cas, les stations de réception relaient les informations reçues à Colorado Springs ou au Commandement de la défense aérienne nord-américain (NORAD) ou au Centre spatial Goddard de la NASA. Car, après accords passés entre les Etats-Unis et d'autres pays, un réseau mondial d'auscultation, un réseau planétaire de nœuds de réception et de lignes de transmissions (dont le pivot est le Centre spatial Goddard, Maryland) fonctionnent vingt-quatre heures sur vingt-quatre, jalonnant les trajectoires des engins mis sur orbite et restant en liaison permanente avec lui. Les satellites scientifiques, les satellites de télécommunications, les satellites utilitaires ne sont pas toujours détectés par les mailles du même réseau. Par exemple celui des missions Apollo est formé:

- par deux centres spatiaux (Goddard et Houston);
- par trois grandes stations d'antennes géantes (Goldstone[1] en Californie, Madrid en Espagne et Canberra[1] en Australie);
- par onze autres stations-radiotéléscopes (Guyamas et Corpus

[1] Radiotélescopes dont le diamètre est respectivement de 64 m et de 26 m.

Christi au Mexique, Cap Kennedy en Floride, Bermudes, Bahama, îles de l'Ascension, îles Canaries, Tananarive à Madagascar, Guam aux îles Mariannes, Kauai à Hawaii, Carnarvar en Australie);
- par quatre navires-radars;
- par huit avions-radars;
- par deux satellites de télécommunication Intelsat (Atlantique et Pacifique).

Tous les messages entre Apollo et le Centre spatial de contrôle de Houston sont échangés par les antennes de Goldstone (64 m), de Madrid et de Canberra (26 m). Les autres stations, les navires, les avions et les radars sont reliés entre eux et au Centre spatial Goddard par des câbles téléphoniques et de télex, par radio et par satellites de télécommunications, toutes ces liaisons représentant le seul fil de vie qui relie les astronautes à la Terre.
L'Union internationale des télécommunications a réparti les gammes d'ondes hertziennes en bandes depuis les FM (87 MHz) jusqu'aux grandes ondes (0,15 MHz) en passant par les ondes moyennes et les ondes courtes (OC). Or, dans les bandes OC il y a précisément des bandes réservées aux liaisons et communications spatiales soviétiques (bande des 20 MHz) et américaines (bande des 40 et 108 MHz).
Les *ordinateurs électroniques de Goddard* enregistrent, analysent, comparent, aiguillent les opérations nécessaires à la réalisation de chaque phase de tous les sous-programmes du programme de chaque mission spatiale: le plus grand d'entre eux peut effectuer chaque opération mathématique en soixante milliardièmes de seconde, traitant chaque jour mille tâches différentes sur la base de quinze fonctions simultanées.
Le Centre spatial Goddard est le quartier général de toutes les stations de poursuite et de repérage, contrôlant le MSFN (Manned Space Flight Network) pour les engins spatiaux pilotés, le STADAN (Satellite Tracking and Data Acquisition Network) pour les satellites d'application et le DSN (Deep Space Network) pour les sondes interplanétaires. C'est donc par Goddard que passent toutes les liaisons entre les engins spatiaux pilotés et le Centre spatial de Houston qui est notamment chargé du contrôle des vols spatiaux pilotés, depuis le lancement des vaisseaux spatiaux jusqu'à leur récupération, ainsi que de toutes les expériences en cours de vol. En effet comment analyser assez rapidement les diverses trajectoires, parcourues à des vitesses fantastiques, et être en mesure de les corriger immédiatement si les instances de contrôle ne peuvent pas traiter instantanément toutes les informations reçues, les traiter «en temps réel». *Au Centre spatial de Houston,* dans le bâtiment n°12, *une batterie d'ordinateurs électroniques* d'une trentaine de mètres de longueur, dénommée le RTCC (Real Time Computer Complex)

du Centre directeur de la mission de la NASA, analyse et compare en temps réel les informations concernant chaque satellite sur orbite en traitant vingt trillions (20^{12}) de bits de données télémétriques pendant une mission de dix jours. C'est d'ailleurs là qu'a été préparé en avril 1970 le retour en catastrophe d'Apollo 13, pour lequel tous les programmes inimaginables avaient déjà été prévus, y compris celui de l'utilisation du moteur du LEM comme mode de propulsion de la cabine pilotée.

4. Conclusions

Ainsi la formidable organisation mise au point par la NASA fait preuve d'une grande faculté d'adaptation grâce surtout aux quelque 1200 ordinateurs électroniques en service, qui conditionnent et garantissent à la fois le bon fonctionnement de toute mission spatiale pour laquelle il faut d'ailleurs recueillir des informations sur des centaines de kilomètres de bandes enregistreuses par jour.
Placée sous le signe d'un triomphe des mathématiques, de la cybernétique et de l'électronique, symbiose dans la prise de décision de l'homme et de l'ordinateur électronique, la conquête de l'espace se réalise dans le plus grand respect des programmes. La précision figure au premier rang dans la panoplie des performances de la NASA: des satellites automatiques sont capables de photographier correctement une balle de tennis à 12 kilomètres, des appareils de radar-radio permettraient aux opérateurs de départager les arbitres d'un match de football, sur un coup douteux, à une distance de 140 kilomètres. Pour ne rappeler que les plus récents exploits, le 5 juin 1966 Gemini 9 a amerri à 800 mètres du point prévu, le 26 mai 1969, après huit jours sur orbite, Apollo 10 a amerri à 17.52 h., c'est-à-dire exactement à l'heure prévue et à 4,8 km du navire «Princetown» qui l'attendait, le 19 novembre 1969 le LEM d'Apollo 12 a aluni dans l'océan des Tempêtes à 14 mètres du point prévu et à quelques centaines de mètres de Surveyor 3, en avril 1970, lors de son retour en catastrophe et même après toutes les corrections de trajectoires, la cabine d'Apollo 13 a amerri à 19.07 h., c'est-à-dire exactement à l'heure prévue par les ordinateurs électroniques.
Il est incontestable que l'exploration spatiale n'aurait pas pu être réalisée sans les moyens très importants qu'exigea la rigueur extrêmement poussée de la préparation, de la gestion et des contrôles: mais ces moyens représentent toute la science acquise au cours des siècles passés, les mathématiques, la physique, la chimie, la mécanique, l'automatique, la recherche opérationnelle et tant d'autres. Leur *dénominateur commun a été l'ordinateur électronique* qui, comme au poker ou au bridge, a permis à tous les joueurs d'exercer un certain contrôle sur le résultat du jeu sans le contrôler

entièrement, les autres joueurs et le hasard influençant également les événements.
Comme l'écrivait Jean Fayard après le retour d'Apollo 13, il est bon de faire remarquer «que dans le domaine des sciences, on ne saurait prendre chaque expérience isolément et lui attribuer un bon ou un mauvais point selon son issue. Chacune participe à une longue série, on sait que tel virus est vaincu quand une forte proportion de cobayes ont guéri. La minorité qui est morte n'a pas moins contribué à l'exploit.»
Ainsi, conduire une locomotive est une chose, arriver à la gare destinataire sans dérailler en est une autre. Or, cela n'est encore rien en regard de l'accomplissement d'une mission spatiale: l'imagination, le génie pratique, la volonté et le courage de milliers de savants, ingénieurs, techniciens, ouvriers et astronautes ont permis de mettre les équipages d'Apollo sur les «rails immatériels» de l'Espace et d'arriver au but sans «dérailler».
Mais, en définitive, *la part de l'homme étant reconnue, tout se ramène à des problèmes* de stochastique, de cybernétique et de régulation *que seuls les ordinateurs électroniques peuvent résoudre.*
Or, le nombre de tous ces problèmes n'est de loin pas épuisé. A Cap Kennedy les prochains lancements auront lieu en juillet 1971 pour Apollo 15, en janvier 1972 pour Apollo 16 et en juillet 1972 pour Apollo 17, le dernier de la série. Les deux fusées Saturne 5 qui seront disponibles du fait de la suppression de deux missions lunaires Apollo seront affectées au lancement de stations-laboratoires «Skylab» dès novembre 1972: les maquettes de ces plateformes orbitales terrestres ont déjà été construites par les grandes sociétés américaines Lockheed et Boeing Co. Après les missions lunaires et des plateformes orbitales terrestres, ce sera alors le début des missions martiennes et vénusiennes dont le président des Etats-Unis a déjà arrêté les dates.