

LE CENTRE DE CALCUL COELACANTHE 1963-1970

LE CENTRE DE CALCUL COELACANTHE

1963-1970

**CAE 133, Haliotis, Périscope de visée astrale, situation tactique
et autres témoignages.**

Chronique rédigée par Claude Kaiser

@Claude Kaiser 2011

Avant-propos

Les événements qui font l'objet de cette chronique scientifique se sont déroulés de 1963 à 1970 dans le 15^e arrondissement de Paris, dans des locaux situés 16 rue Émeriau et 10 rue Sextius Michel.

Nous avons été chargés de la programmation du premier système informatique temps réel embarqué à bord de navires sous-marins français. Le calculateur, alors tout récent, avait à peine le dixième de la puissance et de la mémoire dont on dispose aujourd'hui sur une carte à puce comme celle qu'on peut trouver dans certains téléphones portables, mais avait un encombrement et une consommation comparables à ceux d'un grand centre de calcul. C'était une époque où l'on était loin, très loin, de l'informatique telle qu'on l'a vécue en 2010, après 50 ans d'une évolution fantastique et unique dans l'histoire des sciences et des technologies.

Le lecteur de cette chronique devra faire un gros effort d'imagination, comparable à celui qu'on doit faire pour comprendre le travail d'un artisan ou d'un paysan du 18^e siècle, avant l'apparition de l'électricité et de la mécanisation.

Pour aider le lecteur à faire ce saut en arrière dans le temps, quelques éléments de comparaison avec 2010 sont donnés en annexe.

Résumé

De 1963 à 1970, le STCAN conçoit et réalise avec des calculateurs embarqués à bord du premier sous-marin nucléaire français « Le Redoutable », deux nouvelles aides à la navigation, pour la première fois assistées par l'informatique. La première vise à recalculer la centrale de navigation par inertie en faisant un point par relevé astral à partir d'un périscope de visée astrale (PVA). La seconde présente au commandement une situation tactique calculée à partir d'un ensemble de données provenant des appareils de détection sous-marine (microphones, sonars), électromagnétique (radar) ou visuelle (périscope habituel) et visualisée sur une console graphique. La programmation est réalisée au Centre de Calcul Coelacanthé, majoritairement par des scientifiques du contingent, encadrés par quelques jeunes ingénieurs du corps du Génie Maritime, quelques Ingénieurs de Direction de Travaux et par le futur commandant du Redoutable.

Nous présentons les acteurs, les applications réalisées, les calculateurs disponibles à cette époque, l'architecture matérielle qu'ils ont permis de composer, leur programmation compliquée, l'architecture logicielle spécifique et le moniteur temps réel original mis en place, la conduite de la programmation et le déroulement des essais, à Paris et dans les Arsenaux. Nous complétons par une réflexion sur les conditions enthousiastes dans lesquelles ce travail a été effectué, par une évaluation critique, scientifique et technique, par un retour d'expérience des utilisateurs, par un aperçu de la refonte faite 15 ans plus tard et par le riche bilan humain constaté historiquement. Quelques anecdotes terminent ces souvenirs d'une époque. Les annexes complètent la description technique et donnent un aperçu de carrières d'anciens du Centre de Calcul Coelacanthé.

Le site <http://cedric.cnam.fr/~claudio/HALJOTIS/> est consacré au Centre de calcul Coelacanthé et contient cette chronique accompagnée de quelques documents, de photos, et de la liste des acteurs.

Sommaire

Le projet

Les acteurs par ordre d'arrivée

La commande du périscope de visée astrale

Le périscope de visée astrale

La commande du PVA

Quelques documents sur le PVA

La situation tactique

Les programmes de service pour la situation tactique
Présentation de la situation tactique
L'azimétrie
Les calculs de simulation et la recherche d'un programme satisfaisant
L'engagement tactique
L'aide à la pesée du sous-marin
La bathythermie
La cohabitation des situations opérationnelles

L'architecture matérielle

La programmation

L'architecture logicielle et le système HALIOTIS

Quelques chiffres à titre d'exemple

Génie logiciel

Quelques documents concernant le génie logiciel

Les essais

Les essais du PVA.
Les essais de la situation tactique sur le Redoutable.

Le bouillon de culture

Éléments de bibliographie contemporaine

Nos plus proches voisins

Évaluation critique

Le bilan scientifique et technique
Bilan par les utilisateurs
La refonte et les SNLE/M4
Bilan humain

Bibliographie

Une réflexion en guise de conclusion

Quelques anecdotes

L'arrivée de Pierre Tellier à la CAE en 1965
La méthode Chaix de vérification des programmes
L'arrivée d'Alain Luciano au Centre de Calcul en 1965
La pesée du sous-marin, souvenir de Daniel Poirson
Quand un programme ne marche pas, ce ne peut être à cause du « hard »
Pot de départ de Claude Kaiser en mars 1968
La première étoile du Gymnote en juillet 1968 (Alain Luciano)
Daniel Poirson chez les opérationnels
1969-1970 : DCAN Cherbourg – Section Études/Essais. Guy Bizien
Une anecdote sur mai 68, par Daniel Poirson

Annexes

Liste des principales abréviations
Photos du PVA
Photos du pupitre de visualisation de la situation tactique
Photos des CAE 133 et CAE 174 dans leurs armoires Marine
Que sont les hôtes du CCC devenus ?
Quelques éléments de comparaison avec l'informatique de 2010
Article publié en 1967 dans la revue R.I.R.O.

LE CENTRE DE CALCUL COELACANTHE

1963-1970

CAE 133, système Haliotis, périscope de visée astrale, situation tactique, et autres témoignages.

« *Mon beau navire, ô ma mémoire* » Guillaume Apollinaire

Le projet

À cette époque, le STCAN¹ conçoit et réalise le premier sous-marin nucléaire français « Le Redoutable » (projet Coelacanth²). Il est maître d'œuvre et intégrateur de l'ensemble des systèmes et équipements du sous-marin. Dans ce contexte, le STCAN/CA³ conçoit et réalise aussi deux nouvelles aides à la navigation. La première, dans l'ordre d'importance opérationnelle, vise à recalculer la centrale de navigation par inertie en faisant un point par relevé astral à partir d'un périscope de visée astrale (PVA). La seconde présente au commandement une situation tactique calculée à partir d'un ensemble de données provenant des appareils de détection sous-marine (microphones, sonars), électromagnétique (radar) ou visuelle (périscope habituel) et affichée sur une console graphique.

Ces aides sont devenues possibles, car des calculateurs numériques sont installés à bord de ce SNLE. Ils servent prioritairement pour la conduite de tir des missiles nucléaires de la force de dissuasion, mais ils sont aussi utilisés pour l'aide à la navigation en dehors des périodes où ils servent à la maintenance, aux exercices et aux tirs d'essai des engins.

Le STCAN est maître d'œuvre du projet, initialement appelé Système de Recalage Astral, dont la direction est confiée à l'Ingénieur en chef du Génie Maritime Henri Boucher⁴. Les ingénieurs du Génie Maritime en charge du projet passent

¹ STCAN Service Technique des Constructions et Armes Navales, Boulevard Victor, 75015 Paris.

² Créée en 1962, l'organisation « Coelacanth » englobe tout ce qui concerne les études, le développement et la construction des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) : la propulsion nucléaire, les missiles mer sol balistiques stratégiques (MSBS) et l'environnement à terre de la force océanique stratégique. Voir Meyer J. et Acerra M. Histoire de la Marine Française des origines à nos jours Éditions Ouest-France, 1994. La conception et la réalisation des SNLE s'effectuent sous l'autorité du maître d'ouvrage du programme (MOP Coelacanth), d'abord l'Ingénieur Général du Génie Maritime (IGGM) Bensussan, puis l'IGGM Touffait.

³ STCAN/CA : Groupe Conduite des armes au STCAN, dirigé par l'Ingénieur Général de l'Artillerie Navale (IGAN) Maurice Brunet X 1931

⁴ ICGM Henri Boucher : X 1945, ENSGM (École Nationale Supérieure du Génie Maritime) 1950, puis DCN Ruelle, est un des pionniers de l'informatique française. En 1952, en poste à l'établissement de Ruelle, il fait construire un simulateur analogique, puis en 1962, avec la SEA, la machine digitale Dorothee, utilisée pour la simulation du vol de missiles et pour le calcul scientifique. Fin 1962, il est nommé au STCAN/CA chef de la section SM (sous-marins). Véritable encyclopédie de l'informatique, il publie dès 1960 un cours d'informatique,

commande et installation des matériels à des sociétés comme la CAE⁵, la CSF⁶, la SAGEM⁷, la SINTRA⁸, IBM⁹, etc. Les calculateurs embarqués sont de conception américaine, TRW 133, et sont fabriqués sous licence par la CAE sous le nom de CAE 133. La programmation est réalisée par l'équipe du Centre de Calcul Coelacanthé (CCC) au 16 de la rue Émeriau puis au 10 rue Sextius Michel (dans le même groupe de bâtiments se trouve déjà un important Centre de Programmation de la Marine, le CPM, qui réalise le projet SENIT¹⁰, avec des matériels UNIVAC, pour les navires de surface).

Dans cette équipe de programmation, ils sont la plupart ingénieurs fraîchement diplômés, faisant leur service militaire ou occupant leur premier emploi. L'informatique¹¹ est un nouveau monde qu'ils viennent de découvrir et qu'ils veulent continuer à explorer avec plaisir et gourmandise. Comme l'informatique, ils sont jeunes, et on leur fait confiance ! Ils vont constituer une équipe bien soudée autour de ce projet novateur qui les passionne et dont ils se souviendront encore avec émotion quarante ans plus tard quand ils se retrouveront, jeunes retraités, et qu'ils écriront cette chronique. Ce sont quelques ingénieurs militaires du Génie Maritime (IGM) ou de Direction de Travaux (IDT), et des diplômés de l'École Supérieure d'Électricité (ESE), de l'École Nationale Supérieure d'Électrotechnique d'Électronique d'Informatique d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIH), de Centrale Lyon, de l'Institut Supérieur d'Électronique du Nord (ISEN Lille), de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM), de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), ... , qui y font leur service militaire, puis qui, pour certains, seront embauchés par la CAE, la SARST¹², la SOPEMEA, la SEMA ou l'IRIA avant ou après leur service.

qu'il enseigne à l'ENSEEIH de Toulouse à la demande du professeur Michel Laudet, et à l'ENSGM à Paris. Il anime le séminaire structure des machines de l'AFIRO puis AFCET. Il part diriger le Centre de Calcul Scientifique de l'Armement (CCSA) en 1967 et est remplacé au STCAN/CA/SM par l'ICGM Louis Pasquier.

⁵ CAE Compagnie Européenne d'Automatisme Électronique, fondée en 1960 par CSF, Inter technique et Thomson Ramo Wooldridge (TRW). La CAE adapte des ordinateurs sous licence de la société américaine TRW. La division militaire de CAE est dirigée par Pierre Guichet, ingénieur Arts et Métiers Lille 1952, ESE 1958, Master's of Science de Berkeley en automatismes. Pierre Guichet est entré en 1962 à la CAE, où il dirige la division militaire. Dans le cadre du plan calcul, la CII est créée en décembre 1966 par la fusion de la SEA et de la CAE. La CII hérite des activités militaires de la CAE.

⁶ CSF : Compagnie Générale de Télégraphie sans fil créée au début du 20^e siècle

⁷ SAGEM : Société d'applications générales électriques et mécaniques, créée en 1924

⁸ SINTRA : Société industrielle des nouvelles techniques radioélectriques

⁹ IBM (International Business Machines Corporation) société multinationale américaine. Il s'agit ici de la division militaire d'IBM France créée par Jean-Pierre Brulé.

¹⁰ SENIT : Système d'Exploitation Navale des Informations Tactiques, commencé en 1962. Le CPM est dirigé par Pierre Thellier (X 1952, ICGM) et Alain Chaverebière de Sal (X 1951, ICGM).

¹¹ Le mot informatique, contraction d'information et d'automatique, est introduit en 1962.

¹² SARST : Société Auxiliaire de la Recherche Scientifique et Technique, dont les bureaux se trouvaient rue de Grammont à Paris.

En avril 1966, le commandant Jacques Bisson¹³, futur pacha du Redoutable, est désigné comme représentant de l'État-Major de la Marine auprès des ingénieurs du STCAN/CA, et plus particulièrement de ceux du Centre de Calcul Coelacanthé, pour préciser les besoins des utilisateurs opérationnels. Il participe dès lors aux évaluations des logiciels et permet, par ses conseils avisés et raisonnables, de préciser le besoin du «client», tout spécialement pour la situation tactique.

Les essais du PVA sur site se font d'abord sur le sous-marin Gymnote¹⁴ à Toulon en 1967-1968, puis à Lorient à partir d'août 1968. Ensuite, à Cherbourg¹⁵, vers la fin de la construction du Redoutable en 1969-1970, des essais à bord arrivent à être faits tant du PVA que de la situation tactique. Une première période d'essais à la mer a lieu de juin à novembre 1969. En 1970, le Redoutable quitte Cherbourg pour Brest où des essais à la mer se poursuivent, de décembre 1970 à mai 1971. Un Centre de Calcul est implanté au Centre SOUMENT à Brest, pour entretenir et maintenir les logiciels du SNLE. Il prend le relais du Centre de Calcul Coelacanthé de la rue Émeriau, fermé en mars 1970.

Les acteurs par ordre d'arrivée

Claude Kaiser¹⁶ rejoint le STCAN en 1963. À sa sortie de l'École Nationale Supérieure du Génie Maritime (ENSGM), il reçoit, d'octobre 1962 à Juillet 1963, un an de formation complémentaire à l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Il suit, en auditeur libre, la section spéciale d'informatique du professeur Jean Kuntzmann pour étudier l'informatique (dont Algol 60, Cab 500, IBM 7044) et les mathématiques appliquées¹⁷. Il suit aussi la section spéciale d'automatisme du professeur René Perret où il se familiarise avec les systèmes asservis analogiques¹⁸. Au STCAN en 1963, il est chargé de l'asservissement du PVA.

Pendant leur service militaire, les scientifiques du contingent peuvent être affectés dans un service technique de la Marine, après avoir fait leurs classes. Henri Boucher à l'ENSEEIH, plus tard Claude Kaiser à l'ESE, où ils font cours, le font

¹³ Jacques Bisson : École Navale 1947, École des officiers ASM branche sous-marins, ancien commandant des sous-marins diesel SAPHIR et DAUPHIN, Ingénieur en génie atomique (EAMEA), auditeur de l'École supérieure de Guerre navale. Capitaine de corvette, officier de marque « traitement des données des SNLE ». Sera le premier commandant du Redoutable équipage Rouge.

¹⁴ Le Gymnote est un sous-marin qui sert de plateforme expérimentale pour le projet Coelacanthé. Il est mis en service en 1966, retiré du service en 1986 et démonté en 1990.

¹⁵ Le 29 mars 1967, l'arsenal de Cherbourg met à l'eau le Redoutable (cérémonie de lancement).

¹⁶ IGM Claude Kaiser : X57, ENSGM 1962, affecté au STCAN/CA/SM en septembre 1962 auprès de Henri Boucher. Il quittera le STCAN en avril 1968.

¹⁷ À l'époque, c'est la résolution numérique des équations différentielles et le calcul aux différences (livre de Richard Hamming, Numerical methods for scientists and engineers, McGraw-Hill 1962)

¹⁸ C'est la grande époque des ouvrages de Gilles, Decaulne et Pellegrin.

savoir à leurs élèves, puis ce sont les scientifiques du CCC qui font eux-mêmes la retape. De 1964 à 1967, sont ainsi affectés au STCAN puis au CCC cinq contingents de scientifiques fraîchement diplômés.

Le premier scientifique du contingent, Michel Ritout¹⁹, arrive en janvier 1964 et étudie, sur papier, comment programmer les calculs de changement d'axe avec le calculateur futur, et adapter les transformations trigonométriques pour les rendre suffisamment rapides pour tenir entre deux tops d'échantillonnages de l'asservissement du PVA.

Denis Derville²⁰ arrive aussi en 1964 et commence à se familiariser avec la programmation pour être prêt à recevoir le futur calculateur.

Pierre Bourdon²¹, Christian Imbert²², Georges Imbert²³, Joseph Kandel²⁴ arrivent début 1965, et s'occupent de compléter l'étude et de programmer la commande du PVA. Alain Luciano²⁵ arrive aussi en janvier 1965 et Michel de Guillebon²⁶ les rejoint en septembre 1965.

Jean Le Bihan²⁷ arrive en janvier 1966.

En avril 1966, le commandant Jacques Bisson rejoint le Centre de Calcul Coelacanthé.

Pierre Tellier²⁸ est mis à la disposition du centre Coelacanthé à partir de la mi 1966.

¹⁹ Michel Ritout : ingénieur ENSEEIHT 1961, thèse de mathématiques à Toulouse en 1963 (préparée à EDF avec Jean Carteron, sur des fonctions d'interpolation et d'approximation de mesures et les méthodes informatiques associées) puis service militaire en octobre 1963, affecté au STCAN de janvier 1964 à septembre 1965.

²⁰ Denis Derville : ingénieur ENSEEIHT 1963, service militaire en septembre 1963, soldat 2^e classe de l'Armée de l'Air, affecté au STCAN en 1964 jusqu'en 1965, sera embauché par la CAE et sera le responsable de la programmation faite au Centre de Calcul Coelacanthé jusqu'en 1969.

²¹ Pierre Bourdon : ingénieur ESE 1963, INPG section spéciale de mathématiques appliquées (professeur Jean Kuntzmann) 1964, service militaire en septembre 1964, affecté au STCAN de janvier 1965 à mars 1966

²² Christian Imbert : ingénieur ENSEEIHT 1964 puis service militaire en septembre 1964, affecté au STCAN de janvier 1965 à mars 1966, embauché par la CAE en avril 1966 jusqu'à la fin 1969. Participe aux essais du PVA sur le Gymnote à Toulon.

²³ Georges Imbert : ingénieur ENSAM 1963, INPG section spéciale en automatique (professeur René Perret) 1964, service militaire en septembre 1964, affecté au STCAN de janvier 1965 à mars 1966.

²⁴ Joseph Kandel : ingénieur École Catholique des Arts et Métiers (ECAM-Lyon) 1962, ESE 1964, service militaire en septembre 1964, affecté au STCAN de janvier 1965 à mars 1966.

²⁵ Alain Luciano : ingénieur ETSM/Brest (École Technique Supérieure de la Marine) 1964, IDT (Ingénieur de Travaux) en poste à Toulon, en mission de longue durée au STCAN de janvier 1965 à décembre 1966, chargé de Direction des essais de la commande du PVA à Toulon en 1967 et 1968.

²⁶ IGM Michel de Guillebon : X 60, ENSGM 1965, affecté au CCC de septembre 1965 à avril 1968.

²⁷ Jean Le Bihan : ingénieur ESE 1965, puis service militaire en septembre 1965, affecté au STCAN de janvier 1966 à avril 1967, embauché par la CAE en mai 1967 jusqu'en août 1968.

²⁸ Pierre Tellier : licence es sciences, ingénieur ESE 1963. Service militaire de septembre 1963 à mars 1965 à la recherche scientifique de la Marine, au Laboratoire Radio Radar annexe (contre-mesures électroniques). Embauché à la CAE le 1^{er} avril 1965 par Pierre Guichet, il y réalise alors le moniteur temps réel pour le CAE 133. Puis il est mis à la disposition du centre Coelacanthé à partir de la mi 1966 jusqu'au 30 septembre 1969.

Yves Peirotes²⁹, Jean-Noël Contensou³⁰ et Guy Bizien³¹ sont affectés au STCAN en septembre 1966.

De nouveaux scientifiques du contingent, diplômés en 1966, arrivent au CCC. En septembre 1966, ce sont Gérard Le Lann³² et Jean-Pierre Saada³³. Puis d'autres arrivent en janvier 1967 : Jean-Loup du Chéné³⁴, Claude Jamy³⁵, Alain Lemaire³⁶, Daniel Poirson³⁷, Michel Barnérias, Jean Robert³⁸, Alain Dubreuil³⁹.

Ces scientifiques du contingent sont affectés aux diverses études analytiques et aux travaux de conception et de réalisation des logiciels applicatifs (recalage astral, situation tactique), des logiciels système (gestion des entrées-sorties entre les calculateurs TRW 133, entre chacun de ces calculateurs et des matériels qui leur sont connectés : console, table traçante, horloge, centrale inertielle), ainsi que des programmes de servitude (« atelier de programmation ») permettant la mise au point des logiciels applicatifs et système.

Mireille Bourbotte⁴⁰ rejoint le centre en septembre 1967. Un dernier groupe de scientifiques du contingent arrive en novembre 1967 : Pierre Boullier⁴¹, Claude

²⁹ IGM Yves Peirotes : X 1960, ENSGM 1965, MS Berkeley 1966, affecté au STCAN/CA de septembre 1966 à avril 1970.

³⁰ IGM Jean-Noël Contensou : X 1961, ENSGM 1966, affecté au STCAN/CA de septembre 1966 à septembre 1968, puis à Cherbourg d'octobre 1968 à mars 1970.

³¹ IDT Guy Bizien : ingénieur ETSM/Brest 1966, affecté au STCAN/CA en septembre 1966 jusqu'en 1969, puis 3 mois en mission à Toulon, puis affecté de 1969 à 1970 à Cherbourg, puis à Brest en 1970.

³² Gérard Le Lann : ingénieur ENSEEIHT 1966. Présent au STCAN de septembre 1966 à octobre 1969. Sursitaire embauché par la SARST en septembre 1966, EOR de septembre 1967 à mars 1969, prolongation par l'IRIA jusqu'en octobre 1969.

³³ Jean-Pierre Saada : ingénieur ENSEEIHT 1966. Présent au STCAN de septembre 1966 à octobre 1969. Sursitaire embauché par la SARST en septembre 1966, EOR de septembre 1967 à mars 1969, prolongation par l'IRIA jusqu'en octobre 1969.

³⁴ Jean-Loup du Chéné : ingénieur ESE 1966, puis service militaire en septembre 1966, affecté au STCAN de janvier 1967 à mars 1968, embauché par la SARST en avril 1968 jusqu'à début 1969.

³⁵ Claude Jamy : diplômé de l'Université de Paris 6 (Pierre et Marie Curie) 1966, service militaire en septembre 1966, affecté au STCAN de janvier 1967 à mars 1968.

³⁶ Alain Lemaire : ingénieur ISEN Lille 1966, service militaire en septembre 1966, affecté au STCAN de janvier 1967 à mars 1968, embauché par la SARST jusqu'en mars 2009.

³⁷ Daniel Poirson : ingénieur ESE 1967. Sursitaire embauché par la SARST de juin 1967 à mars 1968, puis service militaire EOR en avril 1968, affecté au STCAN après ses classes jusqu'en mars 1970.

³⁸ Jean Robert : ingénieur École Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble (ENSIMAG)

³⁹ Alain Dubreuil : ingénieur ENSIMAG

⁴⁰ Mireille Bourbotte : ingénieur ENSEEIHT 1967, embauchée par la SARST puis par la SOPEMEA, présente au Centre de Calcul Coelacanthé de septembre 1967 à janvier 1970.

⁴¹ Pierre Boullier : ingénieur ESE 1967. Sursitaire embauché par la SARST de juin 1967 à mars 1968, puis service militaire EOR en avril 1968, affecté au STCAN après ses classes jusqu'en mars 1970.

Chaminadas⁴², Claude Ducarouge⁴³, Jean-Pierre Fargeot⁴⁴, Jean Faure⁴⁵, Jean Ferrié⁴⁶, Didier Guérin⁴⁷, Alain Pistre⁴⁸, Alain Sauvestre⁴⁹, qui participent aux travaux en cours.

La direction du Centre de Calcul Coelacanthé est alors assurée par l'IGM Yves Peirotés, en binôme avec Pierre Tellier. L'IGM Jean-Noël Contensou et l'IDT Guy Bizien, puis les IDT Foucher et Bourdareau, remplissent leur rôle de permanents de la section STCAN/CA/SM, tout comme l'IGM Michel de Guillebon.

La commande du périscopé de visée astrale

Le périscopé de visée astrale

Le sous-marin navigue à l'aide d'une centrale à inertie⁵⁰ qui est fournie par la Sagem⁵¹ et qui indique les coordonnées à tout moment. Cette centrale dérive très légèrement et doit être recalée de temps à autre ; pour cela il faut faire le point de façon précise, même en pleine mer (sans amer terrestre). Le sous-marin doit rester discret pendant ce recalage, donc il doit le faire en immersion périscopique, où n'émerge seulement qu'un mat ou un périscopé. Il existe bien un système de radio navigation utilisant des émetteurs terrestres, le LORAN C⁵² qui est analogique,

⁴² Claude Chaminadas : ingénieur ENSEEIHT 1967 puis service militaire en septembre 1967, affecté au STCAN de novembre 1967 à mars 1969.

⁴³ Claude Ducarouge : ingénieur Centrale Lyon 1966, DEA de Mathématiques Appliquées à Nancy 1967, puis service militaire en septembre 1967, affecté au STCAN de novembre 1967 à mars 1969.

⁴⁴ Jean-Pierre Fargeot : ingénieur ENSEEIHT 1967 puis service militaire en septembre 1967, affecté au STCAN de novembre 1967 à mars 1969.

⁴⁵ Jean Faure : ingénieur ENSEEIHT 1967, puis service militaire en septembre 1967, affecté au STCAN de novembre 1967 à mars 1969.

⁴⁶ Jean Ferrié : ingénieur ENSEEIHT 1967, embauché par la SARST du 1^{er} octobre 1967 au 31 janvier 1968, par la SOPEMEA du 1^{er} février 1968 au 31 janvier 1969, présent au CCC pendant toute cette période.

⁴⁷ Didier Guérin : ingénieur ESE 1967, affecté au STCAN comme EOR recherche scientifique de novembre 1967 à mars 1969, puis embauché par la SEMA jusqu'en août 1969.

⁴⁸ Alain Pistre : ingénieur ENSEEIHT 1967 puis service militaire en septembre 1967, affecté au STCAN de novembre 1967 à mars 1969.

⁴⁹ Alain Sauvestre : ingénieur ESE 1967 puis service militaire en septembre 1967, affecté au STCAN de novembre 1967 à mars 1969.

⁵⁰ Une centrale à inertie est un appareil de navigation de précision comportant des gyroscopes, des capteurs d'accélération et de vitesse angulaire. Il calcule en temps réel à partir de ces mesures l'évolution du vecteur vitesse et de la position du véhicule à bord duquel il est installé, mais aussi son attitude (roulis, tangage, lacet). Les centrales à inertie sont installées à bord de navires, d'aéronefs, de missiles et de véhicules spatiaux.

⁵¹ Responsables de la Centrale Inertielle de Navigation au STCAN : ICGM Bailly (Chef de la Section Navigation), IPGM Barrier (Adjoint), IDT Béchet et IDT Tuveny (à la suite du départ de Béchet à la SAGEM en 68). L'IGM Jacques Barriac, X 1956 (théoricien des composants et systèmes inertiels) est aussi parti à la SAGEM pour épauler les équipes d'études/recherches de ce fournisseur exclusif pour les centrales inertielles de navigation des SNLE.

⁵² LORAN (LONG RAnge Navigation) : système de radionavigation utilisant les ondes d'émetteurs terrestres fixes

donc pas très précis, ainsi qu'un système de navigation par satellite, encore balbutiant (le GPS⁵³ n'est pas encore inventé), le TRANSIT. Ces systèmes utilisent des codes, des émetteurs ou des satellites qui sont américains ; leur disponibilité n'est pas garantie à 100%.

On utilise donc un périscope pour faire le point en visant des astres visibles dont les positions sont conservées dans un catalogue préenregistré. Les éphémérides de ces astres (tables astronomiques donnant pour chaque jour de l'année la position des astres) sont fournies par le Bureau des Longitudes. Le catalogue d'étoiles contient 400 étoiles dont les images sont suffisamment éloignées entre elles pour qu'il n'y en ait qu'une dans le champ de la lunette du périscope. Le point astral par droites de hauteur suppose que l'on ait un référentiel horizontal. Ce périscope est lié mécaniquement au sous-marin ; en conséquence, il faut corriger les mouvements, roulis, tangage, lacet, du bâtiment (fournis par la centrale à inertie), et limiter l'effet des vibrations dues au mouvement de la mer. Le PVA a été conçu de façon astucieuse avec une ossature mécanique parallélépipédique, ce qui assure le parallélisme du miroir supérieur et du miroir inférieur, et qui limite les distorsions dues au mouvement de la mer et aux vibrations⁵⁴. On obtient grâce à l'asservissement une image qui, bien que lissée et extrapolée, vibre autour du centre de visée du périscope. Le commandant, ou l'officier de navigation, observe le ciel au périscope de veille et désigne trois zones de ciel dégagé. Le calculateur recherche alors dans le catalogue d'étoiles une étoile à viser dans chaque zone. L'opérateur du PVA, en général le commandant, observe l'image vibronnaire de l'astre visé, valide la visée, quand il juge que l'amplitude des vibrations est acceptable et que la position moyenne est dans l'axe de visée. On obtient ainsi une précision de quelques secondes d'arc. Le calculateur élabore alors une droite de hauteur pour chaque astre visé, calcule le point au centre du triangle formé par les intersections des trois droites de hauteur et l'affiche sur l'imprimante. On obtient ainsi un point avec une précision d'environ un demi-nautique⁵⁵ (l'objectif spécifié est d'obtenir avec le PVA une précision meilleure que 1500 m).

Pour les calculs du LORAN C, Michel de Guillebon rapporte d'une mission aux Etats-Unis en mai 1968 des formules obtenues au cours d'une visite chez le constructeur et plus précises que celles alors connues en France.

La commande du PVA

Ce projet a été initialisé par l'ICGM Henri Boucher et l'IPGM Pierre Moulinier⁵⁶.

pour établir une position

⁵³ GPS (Global Positioning System) : système de positionnement par satellites

⁵⁴ Responsables de la mécanique, hydraulique et optique du PVA au STCAN : ICGM Cuny (Chef de la Section Optique), IGM Bertrandias (Adjoint). Fournisseur principal : SOPELEM.

⁵⁵ Un (mille) nautique = 1852 mètres

⁵⁶ IPGM Pierre Moulinier : X54, ENSGM 1959, Master of Science de l'université de Berkeley, était chargé des études du système d'armes Masurca. Par ailleurs il était professeur de systèmes asservis à l'École du GM (ENSGM)

La commande analogique du PVA, le « vélodyne », est en étude à la CSF Malakoff. Claude Kaiser suit cette réalisation, se familiarise avec les asservissements échantillonnés et la transformée en Z^{57} , et prépare ainsi les calculs de correction numérique de l'asservissement du PVA. Il spécifie aussi les calculs de changements d'axe nécessaires pour compenser le mouvement du bâtiment (roulis, tangage, lacet) lors d'une visée australe (en gisement et site). Notons que pour que le sous-marin puisse naviguer près du pôle nord où la précision en gisement est insuffisante avec les coordonnées habituelles, il faut prévoir de passer alors à un système de coordonnées plus adapté. À l'inverse, aux environs de l'équateur, l'attention est à porter sur les signes dans la formule faisant intervenir la latitude.

Le premier ordinateur, un TRW 133 américain, arrive au printemps 1965, et est installé dans un hangar poussiéreux de l'Atelier Central d'Électronique où se côtoient des vélos, des rouleaux de câble, une plate-forme oscillante et un pont roulant. Les premières baies électroniques de ce Centre de calcul du « pauvre » (comparé à celui des seigneurs du SENIT installé dans un autre bâtiment connexe à notre « garage à vélos ») contiennent le ordinateur TRW 133, son extension mémoire TRW 174, un lecteur-perforateur de ruban, une baie de multiplexage BRH et deux lecteurs de bandes magnétiques.

Un peu plus tardivement arrive la maquette du palier inférieur du PVA fabriquée par la SOPELEM avec intégration du capteur inductosyn livré par la SAGEM. Le STCAN a fait acheter par la Sagem, à une société américaine, un codeur de précision Inductosyn⁵⁸, analogique, à bobinages inductifs dont le déphasage donne la position de la partie mobile. Ce capteur rotatif donne une précision de l'ordre de la seconde d'arc.

Le capteur Inductosyn demande des réglages très délicats pour éviter que le faible signal analogique obtenu ne soit brouillé par les perturbations électromagnétiques provenant du puissant moteur entraînant le périscope, ou de l'électronique ambiante. De fin 1965 jusqu'à mi 1966, Joseph Kandel fait un travail délicat, persévérant et remarquable, qui permet de garantir la qualité du neutre électrique et de l'isolation électromagnétique du signal analogique envoyé vers le décodeur analogique digital.

Dans un coin du hangar, se trouve aussi une maquette d'un système de codage, appelée « Microgon », un concurrent du codage inductosyn, qui ne sera finalement pas utilisé, soit parce qu'il est trop gros pour la tête du PVA, soit parce que

et à l'École des Télécoms (ENST), où il embauchera Claude Kaiser, puis Michel de Guillebon, pour les petites classes de son cours.

⁵⁷ Livre de J.R. Ragazzini et G.F. Franklin. Les systèmes asservis échantillonnés, Dunod 1962 (original en anglais en 1958), et aussi cours photocopié de Yves Sévely à l'ENSEEIH Toulouse en 1963

⁵⁸ <http://www.cti.fr/inductosyn.html> et <http://www.inductosyn.com> Le bobinage d'un capteur Inductosyn engendre plusieurs sinusoides complètes sur 360° (4 pour le PVA) ; la position angulaire mesurée est alors un sous-multiple de la position mécanique de la partie mobile. Pour obtenir la position angulaire absolue, il faut d'abord dégrossir la position pour se trouver dans la bonne sinusoides.

l'inductosyn donne une résolution angulaire satisfaisante.

Puis fin 1965 le Centre de Calcul Coelacanthé est créé et installé dans des locaux un peu plus adaptés. Henri Boucher en confie la direction à Claude Kaiser. Pierre Bourdon, Christian Imbert, Georges Imbert et Michel de Guillebon complètent l'étude des asservissements, programment la commande du PVA et en font la mise au point sur la maquette du palier inférieur.

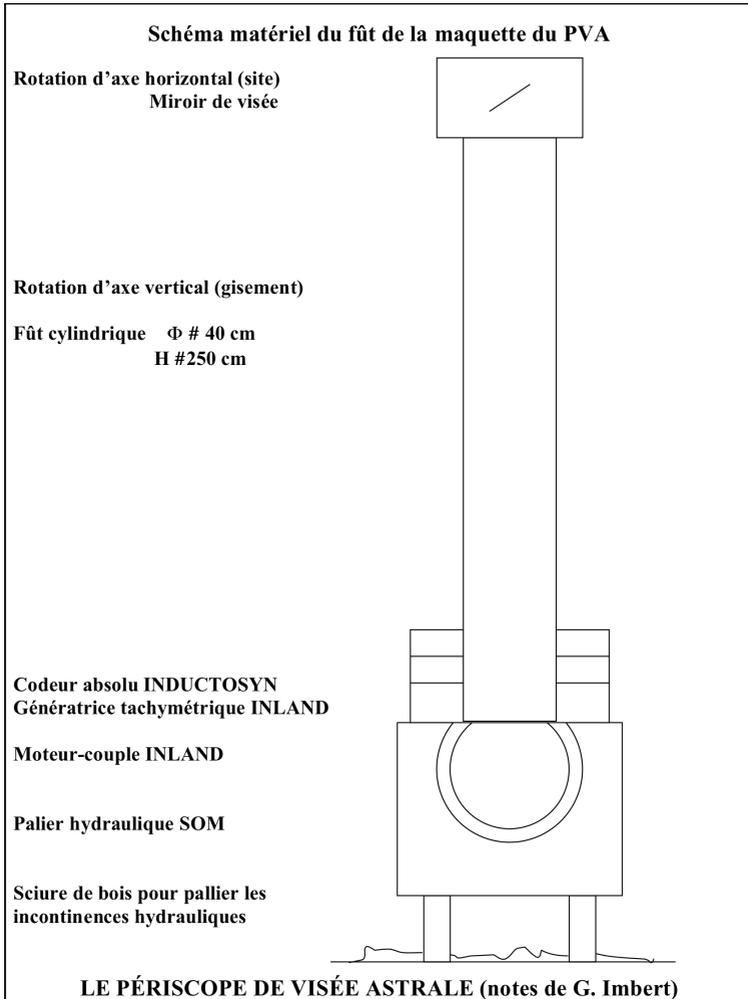
Terminons cette partie par un commentaire technique. Le sous-marin a une assez grande constante de temps, la houle est un mouvement périodique lent. Le temps de réponse du PVA est alors assez grand pour ne pas trop contraindre les calculs de l'asservissement échantillonné. On peut adopter une période d'échantillonnage de 30 ms. Mais pour lire les données, faire la transformation des coordonnées et calculer la commande digitale, il faut presque ce temps avec le calculateur CAE 133. La commande est alors systématiquement envoyée à la période d'échantillonnage suivante. On corrige ce déphasage par un lissage et une extrapolation, qui prennent aussi un peu des 30 ms. Malgré cela, comme on est en fonctionnement asynchrone, que le calculateur doit aussi acquitter des signaux d'interruption, il arrive parfois que le calcul de la commande ne soit pas terminé à temps et, dans ce cas, on saute une commande et on laisse le PVA en boucle ouverte jusqu'à la commande suivante, plutôt que d'accumuler des retards de commande et de perdre le synchronisme entre mesure et commande. Avec ces diverses adaptations, on arrive à commander le PVA avec un calculateur qui a une puissance de calcul limitée.

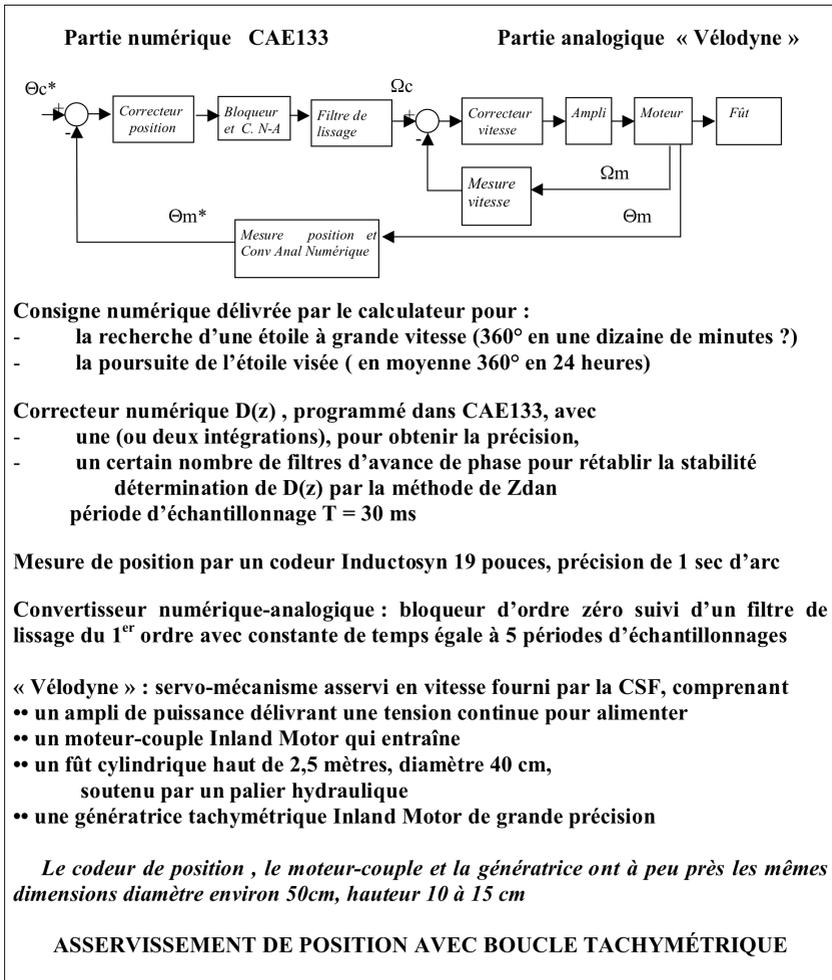
Quelques documents sur le PVA

Des notes d'étude préparent la programmation. Citons quelques documents retrouvés par G. Imbert :

- l'étude n° 5 CA/CSM de mars 1965 « détermination de la fonction de transfert $G(Z)$ du système analogique, (EOR G. Imbert),
- l'étude n° 7 CA/CSM « calculateurs digitaux », rédigée par l'IDT Alain Luciano, est un condensé et une adaptation du cours « Machines informatiques » qu'Henri Boucher dispensait à l'ENSGM,
- l'étude n° 9 CA/CSM de juillet 1965 indique comment est déterminé le correcteur digital $D(Z)$, (A.R. G. Imbert),
- la note d'août 1965 décrit le programme d'interruption utilisé pour la commande sinusoïdale de la maquette de gisement (ce programme utilise 500 mémoires de programme et 2000 mémoires de données), (programmeurs D. Derville, G. Imbert),
- la note de novembre 1965 présente le programme d'analyse harmonique échantillonnée et son organigramme (il utilise 2500 mémoires), (programmeur G. Imbert),
- l'étude n° 10 CA/CSM de février 1966 concerne le lissage et l'extrapolation des valeurs visées (IGM de Guillebon, EVR G. Imbert),

- l'étude n° 11 CA/CSM de mars 1966 concerne la mise au point du correcteur digital D(Z) (EVR G. Imbert).





La situation tactique

Le recalage est pratiquement terminé au début 1968. Au départ de Claude Kaiser en avril 1968, Yves Peirotes le remplace à la direction du Centre de Calcul Coelacanthé qui se consacre alors essentiellement à la présentation de la situation tactique ainsi qu'à l'intégration de tous les programmes sur les calculateurs.

Le second objectif du projet est de présenter au commandement, sur l'écran d'une console ainsi que sur une table traçante, une situation tactique, c'est-à-dire la position, la route et la vitesse des divers mobiles détectés autour du sous-marin, pour permettre à celui-ci de manoeuvrer, voire éventuellement de lancer des leurres et des torpilles. La difficulté majeure réside dans le fait que le sous-marin,

devant impérativement rester discret, n'utilise que ses appareils de Détection Sous Marine (DSM) passive lesquels ne fournissent que des informations de direction (azimuts⁵⁹) et aucune de distance⁶⁰.

Le commandant Bisson, notre homme de terrain, apporte son expérience, et contribue ainsi à orienter les travaux vers des solutions réalistes. Sa gentillesse et sa diplomatie dans les rapports font merveille.

Les essais se font dans un centre de traitement de données installé au CCC avant que la situation tactique ne soit opérationnelle sur le Redoutable.

Les programmes de service pour la situation tactique

La présentation de la situation tactique impose de relier les appareils de détection, que celle-ci soit sous-marine (microphones DSUV2, télémètre acoustique DUUX2, sonar DUUV23), électromagnétique (radar DRUA33, détecteur de radar ARUR10-C) ou visuelle (périscopes habituel), au centre de traitement. Il faut aussi relier les organes de présentation, comme la direction de lancement des armes tactiques (DLA) pour les torpilles et les leurres, l'affichage alphanumérique (l'organe d'affichage est appelé tote) de la console et du pupitre de détection sous-marine, la console graphique et la table traçante. Les ingénieurs du STCAN/CA ont prévu les convertisseurs analogiques digitaux, les armoires d'interfaçage et le câblage des liaisons physiques. Il faut encore réaliser un système informatique réactif capable de récolter des mesures en temps réel et d'envoyer des données à visualiser sur la console et la table traçante.

Les données des appareils de détection sont d'abord simplement mises en forme et envoyées vers la console tactique. Ensuite tout fonctionne selon le principe du « bien pointé ». Une mesure apparaît comme un point nouveau sur la console graphique et c'est l'opérateur de la console qui valide ce point et le rattache à un objectif déjà traité ou le déclare comme un objectif nouveau.

Ces données servent d'entrées à la fonction azimétrie qui doit évaluer une trajectoire à partir de mesures d'azimut bruitées. Il doit en résulter une situation synthétique destinée à la veille tactique et présentée sur la console graphique et sur la table traçante.

La crédibilité de la situation tactique requiert une partie très spécifique : des programmes temps-réel sont exécutés périodiquement pour activer les fonctions automatiques de tests et diagnostics des divers équipements et pour afficher les alarmes sur un écran cathodique en cas de détection de résultat de test négatif. Une équipe comprenant Daniel Poirson, Didier Guérin et l'IDT Foucher s'y emploie sous la direction de Jean-Noël Contensou.

⁵⁹ L'azimut est l'angle horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence, le nord géographique.

⁶⁰ Soit par exemple un mobile qui se dirige vers le sous-marin en gardant un azimut constant ; la seule connaissance de cet azimut ne permet d'évaluer ni la distance, ni la vitesse de ce mobile.

Une salle est installée au Centre de Calcul Coelacanthé avec divers matériels d'essai : un sonar, un télémètre acoustique, des capteurs microphoniques, un simulateur d'échos sonar, un simulateur de lancement d'armes tactiques, une console, une table traçante. Elle permet de simuler le centre de traitement des données du sous-marin et de faire la mise au point et l'intégration de la situation tactique.

Présentation de la situation tactique

L'objectif ⁶¹est d'afficher au commandant une présentation de chaque mobile naval détecté dans le voisinage du submersible. Il faut tenter de caractériser le navire plus ou moins lointain par :

- Son azimut à partir du sous-marin,
- Sa distance,
- Sa route,
- Sa vitesse.

Avec ces données, le commandant peut décider des manœuvres du sous-marin, soit pour s'esquiver, soit pour attaquer (situation exceptionnelle, car le sous-marin doit rester le plus discret possible, mais il est quand même armé de torpilles).

Les dispositifs de bord du sous-marin vont tenter d'évaluer ces paramètres, chacun d'eux pouvant être :

- * Mesuré (par un senseur de bord : azimut ou distance),
- * Vu (au périscope estimation de route et distance),
- * Calculé (par accumulation de données sur des positions successives),
- * Intercalé ou extrapolé (par moyennage des variations antérieures) ,
- * Azimétré (par calcul uniquement des relevés sonars actifs ou passifs),
- * Affecté (par valeur choisie par le responsable du poste se fondant sur sa meilleure estimation).

Dans le document STCAN/CA, Prog. 12 MT 1, SITAC (15 juin 1967), on trouve les informations suivantes :

	Unité	Précision maximum
Azimut	tour	$6 \cdot 10^{-5}$
Distance	mètre	16
Cap	tour	$6 \cdot 10^{-5}$
Vitesse	mètre/seconde	$3 \cdot 10^{-2}$
Défilement	tour/seconde	$4 \cdot 10^{-6}$

Les résultats obtenus pour chaque mobile situé à portée de détection du sous-marin doivent être présentés sur écran. Mais ces résultats sont connus avec plus ou

⁶¹ L'exposé des travaux de recherches effectués pour la situation tactique doit essentiellement aux souvenirs, et à la plume, de Jacques Bisson et de Claude Ducarouge aidé par Claude Jamy.

moins de précision. L'intervalle de confiance de chaque valeur affichée dépend de la fiabilité de la chaîne d'acquisition, puis des erreurs introduites par les calculs de traitement et enfin du vieillissement de l'information dû au délai entre son acquisition et sa présentation.

Les sources d'acquisition à bord sont de deux ordres : écoutes sous marines et senseurs de surface. Certaines sont discrètes, d'autres indiscrètes.

Les écoutes sous-marines sont discrètes pour l'écoute passive (sonar uniquement en écoute) et les télémètres acoustiques, mais indiscrètes en cas d'usage du sonar.

Les senseurs de surface sont tous indiscrets car détectables : les deux périscopes (veille et attaque), le radar, et, un peu plus discret, le détecteur de radar.

Le sous-marin ayant comme objectif principal la discrétion, priorité est donnée à l'exploitation des sources discrètes, sans pour autant s'interdire de pouvoir injecter, si l'occasion s'en présentait, des données ponctuelles permettant de réduire les incertitudes sur les calculs réalisés.

Les résultats doivent être présentés soit sur écran, soit sur table traçante, en associant au point désignant la position du mobile distant un tableau des caractéristiques de navigation du dit mobile (azimut, route, distance, vitesse et d'éventuels renseignements additionnels).

Les travaux d'azimétrie sont menés pour tenter de fournir les meilleures évaluations des paramètres de l'environnement des navires à proximité en utilisant les données récoltées essentiellement de façon discrète.

L'azimétrie

Comme le Redoutable doit rester le plus discret possible, priorité absolue est donnée au système d'écoute passive pour situer l'environnement des navires voisins. Mais les écoutes ne fournissent que des azimuts. L'azimétrie consiste à calculer les autres paramètres caractéristiques d'un objectif (distance, route, vitesse) en utilisant des mesures successives d'azimuts. Pour ce faire, on suppose que l'objectif (parfois on parle de but ou de cible) est en mouvement rectiligne uniforme (hypothèse plausible car le sous-marin est supposé non détecté et les navires de son voisinage sont supposés en transit normal).

La qualité des relevés d'azimut effectués par les appareils de bord dépend de la précision des appareils embarqués, mais aussi des conditions de propagation des ondes sonores en milieu marin. Or ces conditions sont fluctuantes en fonction de la température de l'eau et donc des courants marins. Elles dépendent aussi de la pression, donc de la profondeur d'immersion du sous-marin. La recherche de solution doit prendre en compte le fait que les données reçues sont bruitées et biaisées tant par ces phénomènes physiques que par les imprécisions des appareils de bord.

Quand en plus des suites de mesures d'azimut, on dispose d'un des trois autres

paramètres d'un objectif (en général la distance, relevée par visée périscopique), on peut employer une autre méthode dite de semi-azimétrie, utilisée en particulier pour la mise en œuvre des torpilles.

Avant de disposer de calculateurs embarqués, tous les commandants de sous-marins se sont essayés à réaliser une azimétrie, faite à la main sur la table de suivi tactique du poste de commandement. Mais les résultats n'étaient pas très probants, eu égard notamment au nombre d'azimuts pris en compte et à la dispersion des résultats obtenus. Le commandant Bisson l'avait lui aussi pratiqué lors de ses commandements antérieurs sur sous-marin.

La disponibilité de calculateurs embarqués est à l'origine de nouveaux travaux théoriques sur le traitement des mesures.

La SESA, Société d'Étude des Systèmes d'Automatisme⁶², s'est spécialisée dans les mises en œuvre de moyens de calculs pour traiter des données. Dans une étude sur les processus aléatoires, de Barbeyrac a envisagé plusieurs méthodes : programmation linéaire, méthode itérative, moindres carrés. La SESA anime des séminaires sur le traitement des mesures et l'optimisation statistique. On y présente l'extraction des données, le traitement des erreurs et des bruits. On recherche à réduire les bruits au moyen de lissage par moindres carrés, par lissage linéaire optimal au sens de la variance et par comparaison statistique avec des données liées. On explicite les erreurs introduites par ces lissages et on indique comment choisir la fréquence d'échantillonnage.

La SESA étudie en 1967, sous contrat de la Marine, une méthode de détermination des éléments-but, position et vitesse, fondée sur la programmation linéaire.

Une étude anglaise dite « méthode Eliot », qui repose sur des traitements statistiques, est considérée et fait l'objet d'une analyse sur papier au CCC. Cette étude est restée sans suite et n'a donné lieu à aucun essai de programmation.

Une troisième méthode est conçue et développée par les scientifiques du contingent qui se sont succédé au CCC de janvier 1967 jusqu'à la mise en service du SNLE. Cette méthode, dite des moindres carrés, est à la base des programmes réalisés.

Les calculs de simulation et la recherche d'un programme satisfaisant

C'est Claude Jamy qui ouvre la période initiale de l'azimétrie, quand il arrive au Centre en janvier 1967. Il privilégie la méthode des moindres carrés qu'il avait utilisée au centre de Brétigny pour des minimisations de résidus.

Le choix fait consiste à identifier la rapidité de convergence des résultats et pour cela à procéder par essais successifs de calculs. Il faut à la fois simuler l'arrivée

⁶² La SESA, Société d'Étude des Systèmes d'Automatisme⁶², a été fondée en 1964 par Jacques Stern, X 1952, qui en est alors le PDG.

progressive des données, refaire les calculs itératifs à chaque nouvelle arrivée de données puis présenter les résultats.

Le dispositif de simulation s'organise progressivement dans un dialogue permanent avec le commandant Bisson qui partage son bureau avec Claude Jamy. Le commandant ne cache pas les difficultés identifiées antérieurement en navigation, mais il adhère rapidement aux essais quand les premiers résultats montrent la faisabilité numérique de la démarche.

Deux programmes sont progressivement mis au point et testés par Claude Jamy.

Le premier est réalisé en Fortran sur l'UNIVAC 1107 du LCA (Laboratoire Central de l'Armement situé à Arcueil), accédé à distance en mode batch à partir d'un terminal UNIVAC 1004 situé rue Émeriau au CPM. Ce programme produit des suites de relevés d'azimuts en faisant varier tant les conditions de navigation des cibles que celles du sous-marin, qui est toujours en déplacement avec sa vitesse et sa route, elles-mêmes variables. Chaque série de mesure suppose que la valeur de la vitesse et celle de la position initiale du but sont constantes, et fait varier la vitesse et la route du sous-marin. On calcule, à intervalle de temps variable, l'azimut du but, lequel est ensuite bruité selon un critère de bruit gaussien d'écart-type paramétrable⁶³. Les résultats sont produits sur bandes magnétiques pour pouvoir être injectées sur le calculateur de bord. On dispose ainsi d'une bibliothèque de plusieurs dizaines de situations qui diffèrent en termes de distance initiale, de vitesse, de défilement, et d'écart-type, mais aussi en fonction de la route du sous-marin. Le jeu de tests est progressivement complété lorsque les résultats obtenus par les calculs font apparaître que de nouveaux paramétrages des conditions de route du sous-marin peuvent permettre d'obtenir des résultats qui convergent plus rapidement.

Le second, écrit en langage Atalante pour le CAE 133, met en œuvre une généralisation de la méthode dite des 4 azimuts, en prenant en compte toute la série d'azimuts disponibles. La différence essentielle est qu'au lieu de résoudre un système linéaire de 4 équations à 4 inconnues (2 pour la position initiale et 2 pour la vitesse), qu'on écrit par exemple $AX-B=0$, on traite un système « surdimensionné » de n équations à 4 inconnues, en recherchant la valeur des 4 inconnues qui rend minimale la norme euclidienne du « résidu » $R=AX-B$. D'où la dénomination « moindres carrés » ou « n azimuts » donnée à la méthode, et le nom ZAZI donné au programme, devant l'incongruité qu'aurait été « n -azi », et en clin d'œil à Raymond Queneau.

Le programme de calcul proprement dit doit tenir compte du temps et des déplacements respectifs du sous-marin et de la cible. Entre chaque mesure, les deux mobiles changent de position, et il faut rétablir les données et les résultats dans le référentiel du sous-marin.

⁶³ On utilise le livre « Méthodes pratiques d'étude des fonctions aléatoires » de Jacques Stern, de Barbeyrac et Poggi, édité chez Dunod en 1967.

En novembre 1967 Claude Ducarouge rejoint Claude Jamy. Le binôme fonctionne bien jusqu'en mars 1968, date de départ de Claude Jamy. Des variantes de lissage et de filtrage sont essayées, on tente d'améliorer la chaîne de passage des essais en multipliant les combinaisons de situations simulées (routes du sous-marin soit en transit, soit en patrouille, bruitages divers) et en essayant des filtrages améliorés (doubles moindres carrés, méthode avec contraintes).

Les programmes de simulation permettent de « jouer » des scénarios avec des cibles navales. On lisse et on fait des moindres carrés. Les algorithmes de saisie, de dépouillement et de calcul évoluent. Les outils d'entrée, tant programmes que données, sont rudimentaires. Il faut préparer les bacs de cartes, les bandes magnétiques et les feuilles de lancement pour les opérateurs qui entrent au panneau de commande du CAE 133 les consignes de lancement à chaque étape d'exécution. On améliore progressivement les boucles de programmes de simulation pour réaliser des scénarios successifs sans devoir reprendre la main au pupitre de commande, mais les temps de passage sont longs et nous n'avons pas de points de reprise des programmes de simulation, au moins au début. Les soumissions se font par vacations en heures bloquées sur une machine dédiée. Des feuilles d'opération sont rédigées pour les consignes aux opérateurs.

Les résultats des estimations sortent à l'état brut sur un listing imprimé par l'imprimante de service. On doit alors établir la sensibilité aux variations des conditions de simulations afin de calibrer la rapidité des convergences. En l'absence de table traçante à ce moment, cela nous oblige à construire sur divers abaques millimétrés la synthèse comparative des résultats des essais successifs.

En plus de l'impression des résultats des calculs, nous avons tenté de générer automatiquement la sortie de récapitulatifs permettant d'analyser le rythme de convergence du calcul des résultats. Ce n'est que fin 1968 que les résultats sont imprimés sous forme de courbes sur les listings. On n'a plus à les tracer à la main pour comparer l'effet des résultats issus de différentes situations simulées en fonction des variables choisies.

Il se dégage rapidement des essais réalisés que la convergence vers des résultats significatifs pour approcher les valeurs attendues sur le comportement de la cible nécessite que le sous-marin effectue des changements de cap permanents pour que les azimuts varient fortement en cours de mesure. On rejoint ainsi la constatation faite expérimentalement sur les sous-marins classiques où l'azimétrie se fait manuellement sur table. Le commandant Bisson se retrouve en situation connue. Il nous incite à faire des simulations en faisant tourner en rond le Redoutable (patrouille par opposition à transit). Les boucles sont alors plus ou moins fortes en fonction des vitesses et capacités de navigation du sous-marin. On tente de situer les conditions les plus favorables à une convergence des résultats. La bibliothèque de bandes magnétiques s'enrichit alors de simulations nouvelles en fonction des paramètres choisis pour la navigation du sous-marin.

Certains jours, le commandant Bisson se penche sur les récapitulatifs de résultats

(les « midships azimétrie » ont toujours partagé son bureau). Il tente de définir les conditions optimales de navigation pour saisir au mieux les mesures apportant plus rapidement la convergence souhaitée.

Il faut également savoir éliminer des mesures antérieures quand les divergences constatées permettent de supposer que le mobile cible n'est plus en route rectiligne et qu'il faut donc ignorer les mesures les plus anciennes.

Parfois certains calculs divergents (par exemple lorsqu'on inverse une matrice qui a des valeurs propres trop proches). Claude Jamy et Claude Ducarouge apprennent que cela se produit dans des calculs de physique nucléaire et qu'on y arrête les calculs au bout d'un certain nombre d'itérations. Les effets des erreurs de chute liées en partie aux mauvais arrondis imposés par les tailles de mots du calculateur sont probablement en cause. Il faut donc envisager d'abandonner certains cas qui ne permettent pas de converger⁶⁴.

En mai 1968, Claude Ducarouge reçoit l'aide de Jacques Arnould⁶⁵, DG de la SESA, avec qui il travaille une heure en fin de journée chaque semaine en faisant le point sur les ajouts dans les programmes tant de simulation de création d'azimuts que d'exploitation des traitements. Il tente d'introduire dans les programmes les enseignements des séminaires organisés par la SESA. Cette collaboration avec Jacques Arnould se poursuit pendant toute la seconde moitié de 1968.

À l'affût des nouveautés dans le monde de l'analyse numérique, Claude Ducarouge participe à un séminaire que son ancien professeur de DEA à Nancy, Jean Legras, organise au CETHEDC⁶⁶. À ce séminaire, tenu à Nice, il contacte des représentants de SupAéro (École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace) et du laboratoire CERA (intégré à SupAéro, et alors situé à Vélizy-Villacoublay), à qui il présente succinctement la problématique des approximations successives de route des cibles. Une collaboration avec le CERA est envisagée et des contacts sont pris avec MM. Richalet et Rault. Un marché d'études, mis au point par Marc Pellegrin, directeur de SupAéro et l'ICGM Pasquier, patron du Centre de Calcul Coelacanthé au STCAN/CA/SM, est passé en octobre 1968. Trois lots ont été définis pour une méthode dite ISO-epsilon.

La nouveauté introduite par cette approche concerne la détermination et le calcul de zones d'incertitude sur les paramètres recherchés. Ces zones doivent se

⁶⁴ Dans un article du n° 350 de « Pour la Science », en décembre 2006, consacré par l'académicien Jean-Pierre Ramis aux séries divergentes, on apprend que Poincaré avait déjà parlé de ce problème dans sa « Mécanique céleste » : « Les géomètres disent qu'une série est convergente quand la somme des termes tend vers une limite déterminée. Les astronomes, au contraire, ont coutume de dire qu'une série converge quand les 20 premiers termes, par exemple, diminuent très rapidement, quand même les termes suivants devraient croître indéfiniment. »

⁶⁵ Jacques Arnould : X 1954, DG de la SESA

⁶⁶ Le CETHEDC, Centre d'Études Théoriques de la Détection et des Télécommunications, est créé en 1959 au sein de la DRME (Direction des Recherches et Moyens d'Essais) du Ministère de la Défense. Il est dirigé par le professeur Maurice Bouix, à partir de 1963.

resserrer au fur et à mesure que les informations nouvelles arrivent. Les calculs utilisent la série de Fibonacci pour évaluer la zone d'incertitude autour du vecteur de position calculé. La présentation de cette zone n'est pas encore envisagée en mars 1969 mais elle doit certainement alourdir l'affichage. Nous évoquons d'éventuels pictogrammes pour situer et résumer la taille de la zone d'incertitude (sur chacune des 4 dimensions). Des techniques numériques de quadrillage et de mini quadrillage sont envisagées.

Parallèlement à cette étude, les essais sur les enfants de ZAZI et ZAG (versions successives du programme initialisées en mai et juin 1967) se poursuivent avec des améliorations testées dans les simulations (pré lissages divers et alertes sur les divergences quand la cible change de route et qu'il faut éliminer les anciennes mesures devenues inutiles). Un complément au programme Fortran de création d'azimuts bruités est ajouté pour simuler cette situation.

Pour installer l'azimétrie dans le système opérationnel, il faut mesurer les temps de calcul, des saisies et des affichages, afin de bien les intégrer. Daniel Poirson, Gérard Le Lann et Pierre Tellier se saisissent de l'ensemble réalisé pour l'insérer dans le système dans le cadre des règles d'intégration gérées alors par Jean-Loup du Chéné et Jean-Pierre Saada.

L'engagement tactique

L'engagement tactique est une aide à la direction de lancement des armes tactiques (DLA). Il lui envoie les éléments à fournir aux torpilles et aux leurres.

L'IDT Guy Bizien, arrivant en septembre 1967, est chargé de son étude et de sa programmation. Les contraintes de temps réel sont moins dures que pour le PVA. La période des calculs est en secondes et Guy Bizien peut utiliser le langage Atalante, un langage structuré qui rend visible la logique et les différents niveaux des programmes et des données. Ce langage, bien que peu performant et gourmand en mémoire, permet un gain de productivité et il peut être utilisé pour les procédures hors temps réel. La résolution de la figure de lancement de la torpille sur le but est impossible par la voie directe compte tenu des paramètres réagissant entre eux (vitesse, giration, immersion...). Mais un calcul par itération, bien adapté au calcul numérique, apporte une solution élégante au problème.

L'aide à la pesée du sous-marin

La pesée du sous-marin est un autre programme censé faciliter la tâche des sous-marinières.

Pour naviguer horizontalement en immersion, c'est-à-dire avec une assiette zéro, le poids du sous-marin doit équilibrer la poussée d'Archimède et être correctement appliqué. Un écart peut être compensé par l'action hydrodynamique sur les barres de plongée, action d'autant plus grande que la vitesse est élevée. Mais à très faible

vitesse, les barres n'ont plus d'effet et il faut donc ajuster le poids en admettant de l'eau (ou en en pompant) dans des caisses dites de réglage, afin d'obtenir un poids apparent nul. L'assiette est ajustée par mouvements entre caisses avant et arrière.

Le « dégrossissage de la pesée » se fait avant l'appareillage à partir de la liste des poids embarqués (vivres, rechanges, ...). Elle est ajustée lors de la première plongée au vu des tendances du sous-marin, en réduisant progressivement la vitesse. C'est pour faciliter cette tâche qu'est rédigé un programme qui, à partir d'un modèle mathématique du sous-marin immergé et des angles de barre, fournit les corrections de poids à apporter aux caisses de réglage et les mouvements entre caisses d'assiette.

Le programme d'aide à la pesée du sous-marin est réalisé par Alain Sauvestre.

La bathythermie

La propagation du son dans l'eau de mer varie en fonction de la température, de la pression et, marginalement, de la salinité. Ces paramètres varient avec la profondeur. Le relevé du gradient de la température (la bathythermie) permet de détecter des inversions de gradient, situations qui créent une sorte de guide d'ondes sonores qui propage le bruit sur de très grandes distances. Le profil bathythermique permet de repérer les couches d'eau qu'il vaut mieux éviter pour que le sous-marin puisse rester discret.

Le calcul de la bathythermie n'est pas une fonction temps réel.

La cohabitation des situations opérationnelles

L'ensemble des programmes ne tient pas en mémoire dans les calculateurs. L'utilisation des calculateurs est alors organisée de la façon suivante.

Un module fonctionne en permanence. C'est le module « Situation tactique » qui enregistre les données des différents senseurs en les affectant aux mobiles origines et qui effectue certains calculs, par exemple pour l'extraction automatique des azimuts, puis qui fournit à l'écran de la console et à la table traçante les éléments de présentation.

Ce module réside en permanence en mémoire et est couplé à l'un des trois modules ci-après :

- soit au module « Recalage » pour la mise en oeuvre du système de recalage astral (commande du PVA puis calculs du point),
- soit au module « Engagement tactique » pour la mise en oeuvre de la Direction de Lancement des Armes (DLA, calculant les éléments à fournir aux torpilles),
- soit au module « Servitudes » pour les calculs d'azimétrie et ceux d'aide à la « Pesée ».

Quelques documents sur la situation tactique

Des notes d'étude accompagnent la réalisation de ce système de traitement de données. Citons quelques documents retrouvés par Claude Ducarouge :

- l'étude n° 7 CA/CSM juillet 1965 Alain Luciano (Calculateurs digitaux),
- l'étude n°19 CA/CSM (Périphériques : visualisation),
- l'étude n°38 CA/CSM (Livre blanc du LV Carteron),

et par Gérard Le Lann :

- le document STCAN/CA, Prog. 12 MT 1, SITAC (15 juin 1967).

L'architecture matérielle

Le centre de traitement installé à bord du sous-marin est un système relativement innovant pour l'époque. Il est constitué de 4 calculateurs CAE 133 de 32K mots de 15 bits, couplé chacun à une armoire d'extension supplémentaire de 32K mots de 15 bits (CAE 174). Ils sont organisés en deux groupes de deux machines en backup réciproque, de façon à ce qu'une paire de machines soit toujours disponible pour la conduite de tir des missiles de la force de dissuasion. De nombreux canaux d'entrées-sorties relient ces calculateurs à des périphériques communs à tous :

- 2 baies de disques IBM (IBM 2310) pouvant recevoir des « galettes disque (IBM 2315) » de 14 pouces, amovibles, d'une capacité de 512K mots, permettant de stocker les programmes et les données, dont le catalogue des étoiles pour le PVA,
- une horloge temps réel, nécessaire pour la gestion du système, a été ajoutée pour donner le temps courant,
- un pupitre de commande permettant l'affectation et le chargement initial de chaque groupe de calculateurs,
- une console SINTRA de commande et de visualisation, à tube cathodique et à balayage cavalier (mais sans générateur de vecteur, cette fonction constituant une option !),
- une table traçante Benson 10 buts,
- et les autres équipements à usage militaire (détection sous-marine par microphones, télémètre acoustique et sonar, périscope, radar, détecteur de radar, centrale de navigation à inertie).

Le calculateur TRW 133⁶⁷ a été conçu vers 1960 puis il est fabriqué sous licence par la CAE sous le nom de CAE 133. Il est assez compact pour l'époque (64 pouces de haut, 21,5 pouces de largeur et 17,5 pouces de profondeur) et pèse 600 livres). Sa technologie est à base de diodes et de transistors discrets. Il comprend :

⁶⁷ Le site <http://bitsavers.org/pdf/trw/> contient, en 2010, quelques photos et documents sur le TRW 133 et le TRW 130, dont la brochure du BR-133, le listing de l'assembleur, la bibliothèque des logrammes et un article de Richard H. Hill « Stored Logic Revisited » de décembre 1961 sur la microprogrammation appliquée au TRW 130.

- Une mémoire à tores de ferrite de 32K mots de 15 bits, avec un cycle mémoire de 2 microsecondes. Chaque mot mémoire a un 16^e bit de parité.
- Une unité centrale fonctionnant à 1 Mhz. Elle n'a que 6 registres internes, tous adressables, M (compteur ordinal), E (décodeur de commande), L (accès aux 64 mots de mémoire scratchpad), A (registre arithmétique), P (extension de A), T (tampon d'entrée-sortie) dont 4 peuvent servir d'index d'adressage ; il y a un mode d'adressage indirect et des bits d'option. La trentaine d'instructions (logandes) est à demi-adresse (un mot pour le code opération, le suivant pour l'adresse ou un complément de code opération) ; Ces opérations sont très élémentaires, celles qui sont plus complexes se font par appel de sous-programmes appelés logrammes. Il n'y a pas de protection mémoire, pas d'horloge temps réel interne, pas de mode exécutif protégé, pas de possibilité de translation dynamique d'adresse, mais il y a un système d'interruption avec plusieurs niveaux câblés. Le traitement de l'interruption ne comprend cependant qu'un seul niveau programmé et nécessite une longue analyse pour détecter l'origine de l'interruption (1 à 2 ms).
- Le programme d'amorçage (bootstrap) est câblé en mémoire.
- Un lecteur-perforateur de ruban est le support de base pour rentrer les programmes à exécuter et sortir les résultats.
- Une machine flexowriter permet aussi de rentrer des commandes ou des instructions une à une et de sortir des listings.

L'extension mémoire CAE 174 de 32K mots de 15 bits, avec un cycle mémoire de 4 microsecondes est aussi à tores de ferrite. Chaque mot mémoire a un 16^e bit de parité. Elle est reliée au CAE 133 par 4 canaux simultanés qui fonctionnant en DMA sur le CAE 133, ce qui autorise un accès direct à la mémoire centrale.

Le système nerveux de l'architecture matérielle est l'ensemble des canaux de communication qui, partant de chacun des calculateurs, permettent de les raccorder à diverses sortes de périphériques. Ces canaux répondent aux normes américaines pour le NTDS (« Naval Tactical Data System »). Celles-ci comprennent la définition des fils de connexion utilisés pour le transport de commandes ou de données, et la spécification des niveaux électriques, de la dynamique de changement de niveau, et du protocole à respecter pour les interconnexions des matériels. Sur chaque calculateur, on dispose ainsi de plusieurs types de canaux à transfert de données en parallèle :

- Un canal A de 30 bits pour la liaison synchrone entre calculateurs d'une paire.
- Un canal B d'accès synchrone à 30 bits, utilisé pour les accès disques.
- Un canal C d'accès synchrone à 15 bits, pour les périphériques.
- Quatre canaux D en accès simultané pour communiquer avec l'extension de mémoire tout en laissant le calculateur libre d'effectuer toute autre opération.

La vitesse de transfert des canaux A et B est de 43 500 mots/s en entrée et de 33 000 mots/s en sortie. Le canal C et les canaux D permettent 52 500 mots/s en entrée et 55 000 mots/s en sortie. Les transferts par les canaux A et D permettent des transferts par blocs de données et non pas seulement mot par mot.

L'architecture doublée s'appuie sur le multiplexage et la redondance des communications (voir le schéma ci-dessous, issu de l'article RIRO de 1967).

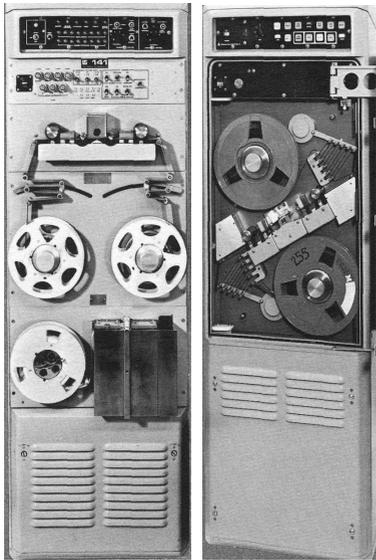
Chaque périphérique émet vers deux unités d'échange CAE 102 gérant les canaux C, une unité par groupe de calculateurs. Chaque unité CAE 102 assure le multiplexage de ces liaisons avec les périphériques, en étant connectée aux deux calculateurs CAE 133 du groupe.

Les deux baies de disques IBM sont associées chacune à une paire de calculateurs par le canal B de chacun d'eux, et ont chacune accès en backup aux tourne-disques qui reçoivent les galettes disque.

La conception de l'architecture matérielle d'ensemble pour répondre aux besoins opérationnels est l'œuvre de l'ICGM Boucher⁶⁸, l'étude de l'installation à bord et la commande aux fournisseurs sont dues à l'ICGM Boucher, l'ICGM Chaix, l'ICGM Pasquier et l'IPGM Picot⁶⁹.

⁶⁸ Note de Henri Boucher par courriel du 4 juin 2010 « Le choix du RW133 n'était pas le mien ni celui de l'État Major. Quand j'ai été nommé à Paris, ce choix n'était pas fait, et je militais pour l'USQ20 Univac, que l'OTAN proposait pour tous les navires de combat de l'alliance. Je suis plusieurs fois allé à Bruxelles comme conseiller technique du Capitaine de Vaisseau qui s'occupait de cette question, quand on envisageait de produire ces machines dans une usine Univac allemande. Bien que ce projet européen ait capoté, le premier SENIT a été édifié avec des USQ20. Le RW133 a finalement été choisi pour le SNLE pour satisfaire la SEREB, qui avait utilisé des CAE 130 pour les missiles SSBS du Plateau d'Albion (armée de l'air). Pour forcer la main au décideur (le MOP ?), la SEREB a utilisé une lettre antidatée. Je me suis aperçu tout de suite de la tricherie, mais je n'ai pas su convaincre. Je pense toujours qu'une paire d'USQ20 30 bits aurait été bien plus efficace qu'un quadruplet de RW133 15 bits, apportant en outre l'arsenal complet des dispositifs nécessaires à la programmation temps réel. » Henri Boucher complète ici ce qu'il avait écrit dans l'article « L'informatique dans la Défense » présenté au colloque Histoire de l'Informatique, à l'INPG Grenoble en 1988.

⁶⁹ Yves Picot X56 ENSGM 1961



Lecteur-perforateur de ruban
Dériveur de bande magnétique

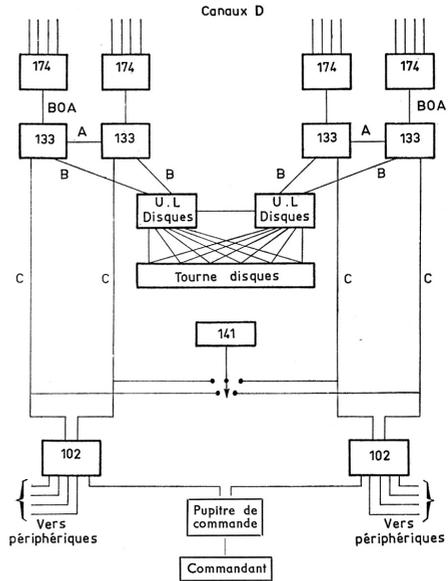


Figure 5
Schéma du centre de traitement des données

Architecture selon l'article RIRO de 1967

La programmation

La programmation se fait par « logandes » (instructions câblées avec code opération, mode d'adressage direct ou indirect, bits d'options et code opération complémentaire) ou par « logrammes » (bibliothèques de sous-programmes en logandes): une instruction tient en général sur 2 mots, le premier pour l'opération elle-même, le second pour l'adresse.

Le jeu d'instruction, une trentaine de logandes (« logical command »), est inspiré des jeux de microprogrammes⁷¹. Les instructions de base autorisent de multiples combinaisons d'adressages, ce qui permet des astuces comme la permutation des contenus de registre et de mémoire avec branchement simultané. Ces astuces apportent une efficacité utile pour le temps réel, mais rendent le code illisible et difficilement maintenable.

Une instruction logande de type 1 comporte plusieurs champs IP/AR/M/EI :

⁷¹ Michael Flynn and Donald MacLaren. Microprogramming revisited. ACM National Meeting 1967. Le TRW 133 apparaît en référence 15.

IP : zone de commande principale, permettant 54 opérations,
AR : zone d'adressage des registres ou de mémoire, permettant 8 options,
M : zone de modification automatique,
EI : zone de commande secondaire, pour 16 conditions, ou 16 opérations secondaires ou un paramètre.

Les programmes sont enregistrés à partir d'un ruban perforé et les premières instructions du programme doivent s'enchaîner au code de l'amorce («bootstrap») câblé en mémoire. Les programmes sont modifiables par un jeu d'interrupteurs (15 par registre) sur un pupitre permettant d'accéder aux 6 registres internes. Ces opérations longues provoquent un certain embouteillage et quelques discussions pour définir la priorité de passage des utilisateurs. Pour vives que soient certaines de ces discussions, elles n'entachent pas l'ambiance amicale qui règne au sein du groupe.

Les « logrammes », qui sont des bibliothèques de sous-programmes stockées en mémoire réelle, présentent quelques défauts de performance et de volume mémoire pour leur utilisation dans le domaine du temps réel. Ils sont néanmoins utilisés, parce que nécessaires, en particulier pour les fonctions mathématiques (par exemple, les changements de coordonnées font appel aux fonctions trigonométriques).

À cause du manque de place en mémoire, il faut les réécrire pour les optimiser, quelques fois « à outrance », au risque de les rendre illisibles et probablement peu maintenables! Cependant cette gymnastique est pratiquement la seule possibilité de faire tenir les programmes, au final assez complexes et nombreux, dans 64K mots de 15 bits.

Un assembleur classique (sans macroopérations) est fourni, évidemment sur ruban perforé (une cinquantaine de mètres). Il lit un ruban perforé source et fournit un ruban perforé de code binaire. Il n'y a pas d'éditeur de liens : tout est généré en adresses absolues.

TRW fournit aussi un compilateur Fortran II qui a 8 K mots de code et qui compile en trois passes ⁷²:

- On charge la première moitié du compilateur.
- On place le ruban source Fortran sur le lecteur et on lance la première passe.
- Le compilateur lit « ligne à ligne », imprime la liste sur la machine à écrire, analyse et perfore au fur et à mesure un ruban intermédiaire (pseudo code).
- On charge la deuxième moitié du compilateur.
- On place le ruban intermédiaire sur le lecteur et on lance la deuxième passe.
- Le compilateur lit et assemble le pseudo code, et simultanément perfore un code binaire.
- Une troisième passe utilise un ruban perforé auxiliaire qui contient le « chargeur » du code binaire et les routines d'exécution standard (*Run Time*).

⁷² Voir Philippe Denoyelle, article cité

LE CENTRE DE CALCUL COELACANTHE (1963-1970)

STANDARD LOGRAM SET
AN/UYK-1 (TRW-130)

CALLING SEQUENCE	NAME	FUNCTION	CELLS	EXECUTION TIME (μ s)
WORD TRANSFER				
LD1/G	Load Accumulator	$(G) \rightarrow (\$AL)$	4	54
LD2/G		$(G, G+1) \rightarrow (\$AL, \$AR)$	6	78
LN1/G	Load Numeric	$((G) \rightarrow (\$AL))$	8	If (G)+, 66; If (G)-, 78
LN2/G		$((G, G+1) \rightarrow (\$AL, \$AR))$	12	If (G)+, 96; If (G)-, 132.
LC1/G	Load Complement	$-(G) \rightarrow (\$AL)$	6	66
LC2/G		$-(G, G+1) \rightarrow (\$AL, \$AR)$	10	120
IA1	Load Indirect	$((\$AL) \rightarrow (\$AL))$	4	60
IA2	Accumulator	$((\$AL, \$AR) \rightarrow (\$AL, \$AR))$	6	84
LQ1/G	Load MQ	$(G) \rightarrow (\$AR)$	4	54
LQ2/G		$(G, G+1) \rightarrow (\$QL, \$QR)$	6	78
ST1/G	Store Accumulator	$(\$AL) \rightarrow (G)$	4	54
ST2/G		$(\$AL, \$AR) \rightarrow (G, G+1)$	6	78
SQ1/G	Store MQ	$(\$AR) \rightarrow (G)$	4	54
SQ2/G		$(\$QL, \$QR) \rightarrow (G, G+1)$	6	78
SZ1/G	Store Zero	Zero $\rightarrow (G)$	3	42
SZ2/G		Zero $\rightarrow (G, G+1)$	4	54
EX1	Exchange	$(\$AL) \rightarrow (\$AR)$	5	60
EX2		$(\$AL, \$AR) \rightarrow (\$QL, \$QR)$	8	96
ARITHMETIC				
AD1/G	Add	$(\$AL) + (G) \rightarrow (\$AL)$	5	66
AD2/G		$(\$AL, \$AR) + (G, G+1) \rightarrow (\$AL, \$AR)$	9	114
SB1/G	Subtract	$(\$AL) - (G) \rightarrow (\$AL)$	6	78
SB2/G		$(\$AL, \$AR) - (G, G+1) \rightarrow (\$AL, \$AR)$	9	120
MP1/G	Multiply	$(\$AL) \times (G) \rightarrow (\$AL)$	23	If (G)+, 168; If (G)-, and (\$AL)+, 192; (\$AL)-, 216.
MP2/G		$(\$AL, \$AR) \times (G, G+1) \rightarrow (\$AL, \$AR)$	73	If (G)+, and (\$AL)+, 627 If (G)+, and (\$AL)-, 879 If (G)-, and (\$AL)+, 843 If (G)-, and (\$AL)-, 807
DV1/G	Divide	$(\$AL, \$AR) \div (G) \rightarrow (\$AL)$	46	If (G)+, and (\$AL)+, 180 If (G)+, and (\$AL)-, 330 If (G)-, and (\$AL)+, 270 If (G)-, and (\$AL)-, 258
DV2/G		$(\$AL, \$AR, \$QL, \$QR) \div (G, G+1) \rightarrow (\$AL, \$AR)$	148	1062 (Average time)
BRANCH				
BUN/G	Branch Unconditional	Branch to G	3	36
BPN/G	Branch on Positive Accumulator	Branch to G if sign of (\$AL) is positive	5	If (\$AL) is positive: 48 If (\$AL) is negative: 66
BMN/G	Branch on Minus Accumulator	Branch to G if sign of (\$AL) is negative	5	If (\$AL) is negative: 48 If (\$AL) is positive: 66
BAN	Branch to Accumulated Address	Branch to (\$AL)	2	30
BVN/G	Branch to Overflow	If machine overflow = 1, branch to G	4	If overflow: 36 If no overflow: 48
BDK/G	Branch on Divide Check	Branch to G if \$DK = 1	6	If divide check: 60 If no divide check: 78
BZ1/G	Branch on Accumulator Zero	If (\$AL) = 0 branch to G	5	If (\$AL) = 0: 48 If (\$AL) \neq 0: 66
BZ2/G		If (\$AL, \$AR) = 0 branch to G	6	If (\$AL, \$AR) = 0: 60 If (\$AL, \$AR) \neq 0: 78
CE1/G/H	Compare Equal	If (\$AL) = (G), branch to H	9	108
CE2/G/H		If (\$AL, \$AR) = (G, G+1), branch to H	13	If (\$AL) = (G), 144 If (\$AL) \neq (G), 108
CG1/G/H	Compare Greater	If (\$AL) \geq (G) branch to H	9	108
CG2/G/H		If (\$AL, \$AR) \geq (G, G+1), branch to H	14	150
CL1/G/H	Compare Less	If (\$AL) < (G), branch to H	9	108
CL2/G/H		If (\$AL, \$AR) < (G, G+1), branch to H	14	150
TDN/G/H	Test and Decrement	$(G) - 1 \rightarrow (G)$; If resulting (G) = 0, branch to H	9	108
LJN/G/H	Link Jump	Next logand starting address $\rightarrow (G)$; branch to H	5	60
HPN/G	Halt and Proceed	If in flag mode, a halt occurs; when restarted branch to G	3	36
LVN/G/H	Leave Interpretive Mode	G \rightarrow (\$RET); branch to H	5	60

Extrait de la bibliothèque de logrammes
(bitsavers.org/pdf/trw/trw-130/)

			11AA0010 01B1LD1	+LOAD ACCUMULATOR S-L	0000400054US	0010000
13207	60600	LD1	NG IP C NO	LOAD E WITH (G)MS		0010001
13210	52162		SE DL \$AL	STORE E IN AC		0010002
13211	42171		SP DL \$1C	STORE P IN IC		0010003
13212	62200		LP DP C NO	R EXIT		0010004
			11AA0020 01B2LD2	+LOAD ACCUMULATOR D-L	00006000078US	0020000
13213	60600	LD2	NG IP C NO	LOAD E WITH (G)MS		0020001
13214	52162		SE DL \$AL	STORE E IN AC		0020002
13215	42171		SP DL \$1C	STORE P IN IC		0020003
13216	60300		NG DA C NO	LOAD E WITH (G)LS		0020004
13217	52163		SE DL \$AR	STORE E IN M(AR)		0020005
13220	62300		LP DA C NO	R EXIT		0020006
			11AA0030 01B1LN1	+LOAD NUMERIC S-L	00008000066US	0030000
13221	60615	LN1	NG IP C LA			0030001
13222	42171		SP DL \$1C			0030002
13223	20035		BR DM AP			0030003
13224	13227		PZE LWI+6			0030004
13225	65001		CS DM C AI			0030005
13226	00000		PZE 0			0030006
13227	50162		SA DL \$AL			0030007
13230	62200		LP DP C NO	R		0030008
			11AA0040 01B2LN2	+LOAD NUMERIC D-L	00012000096US	0040000
13231	60610	LN2	NG IP C LT	LOAD T WITH (G)MS		0040001
13232	42171		SP DL \$1C	STORE P IN \$1C		0040002
13233	75304		LA DA C AT	LOAD A WITH (G)LS, EXCHANGE A,T		0040003
13234	20035		BR DM AP	BRANCH IF A POSITIVE		0040004
13235	13242		PZE LNZA			0040005
13236	67064		CC DM B AT	COMPLEMENT (G)MS, EXCHANGE A,T		0040006
13237	65001		CS DM C AI	COMPLEMENT (G+1)		0040007
13240	00000		PZE 0			0040008
13241	64061		AT DM B AI	ADD CARRY TO (G)		0040009
13242	50162	LNZA	SA DL \$AL	STORE		0040010
13243	40163		ST DL \$AR	STORE		0040011
13244	62571		LP IL \$1C	R EXIT		0040012
			11AA0050 01B1LC1	+LOAD COMPLEMENT S-L	00006000066US	0050000
13245	60615	LC1	NG IP C LA	LOAD A WITH CONTENTS OF G		0050001
13246	42171		SP DL \$1C	STORE Y+2 IN \$1C		0050002
13247	65001		CS DM C AI	COMPLEMENT A		0050003
13250	00000		PZE 0			0050004
13251	50162		SA DL \$AL	STORE A IN \$AL		0050005
13252	62200		LP DP C NO	R EXIT		0050006
			11AA0060 01B2LC2	+LOAD COMPLEMENT D-L	00010000120US	0060000
13253	60600	LC2	NG IP C NO	LOAD A WITH CONTENTS OF G+1		0060001
13254	52163		SE DL \$AR	STORE G IN \$AR		0060002
13255	42171		SP DL \$1C	STORE Y+2 IN \$1C		0060003

Extrait de listing de loggrammes
(bitsavers.org/pdf/trw/trw-130/)

L'architecture logicielle et le système HALIOTIS

On a vu que l'architecture matérielle était doublée (deux groupes de deux calculateurs) pour améliorer la disponibilité du système pour les engins et que l'affectation et le chargement initial de chaque groupe de calculateurs devait se faire depuis un pupitre de commande. Le programme Superviseur de ressources (réalisé par Derville, Le Bihan, Boullier) met en place les configurations matérielles possibles et les programmes correspondants. Il existe un programme Superviseur dans chaque calculateur de la configuration. Le Superviseur comprend une partie fixe (liaison avec le pupitre de commande centralisée et avec la CAE 141, liaison avec les disques), et une partie variable qui dépend de l'activité du calculateur. Des tables d'état du système, présentes sur les calculateurs de la configuration, sont lues et modifiées en ligne par les clones du Superviseur, qui en assurent la cohérence par des messages sur le canal A. Ces Superviseurs forment un programme unique, réparti sur les 4 calculateurs pour coordonner le multitraitement.

L'architecture logicielle doit gérer plusieurs fonctions opérationnelles utilisant les

calculateurs :

-- La commande numérique par asservissements échantillonnés du périscope permettant de viser des astres, puis le calcul du point par la méthode des droites de hauteur.

-- L'acquisition, la centralisation et la présentation des données temps réel relevées par les appareils d'observation et de navigation du bâtiment (signaux sonores, électromagnétiques ou optiques) pour la situation tactique.

-- Le calcul en temps réel de l'azimétrie et sa présentation complétée par un dialogue homme machine.

-- Le calcul et l'envoi des éléments nécessaires à la direction de lancement des torpilles ou des leurres, lors de l'engagement tactique.

-- L'aide à la pesée du sous-marin.

-- La bathythermie.

Le code opération de la machine ne permet pas la réentrance⁷³, il n'y a pas de mode maître, ni de protection mémoire. Une instruction permet de masquer et démasquer les interruptions. Mais le traitement de l'interruption est trop coûteux pour qu'on puisse l'utiliser pour commuter les programmes (et faire de l'ordonnancement préemptif). Une fois commencée, l'exécution d'un programme doit aller jusqu'à son terme. Pour garder la réactivité demandée par le temps réel, on limite donc la durée maximale de l'exécution d'un programme à 50 millisecondes.

À cause de la non-réentrance, toute interruption, « temps réel » ou autre (fin d'entrée-sortie sur le canal D par exemple), ne peut être traitée que si elle n'utilise pas de logramme. On se contente de l'enregistrer dans une table du moniteur. Elle est analysée en fin d'exécution du programme en cours et son action est alors prise en compte par le moniteur (avec réarrangement des priorités et urgences des programmes en attente d'exécution).

À cause des contraintes de temps de réponse en temps réel, les programmes critiques doivent résider en mémoire centrale. Ceux qui sont moins urgents se partagent une zone de mémoire de recouvrement (« overlay ») ; avant son exécution, un tel programme est d'abord chargé à partir du disque et placé dans cette zone de mémoire de recouvrement à une adresse fixée une fois pour toutes. (rappelons qu'il n'y a pas de concurrence entre les entrées-sorties et le traitement). Comme tous les programmes ne tiennent pas sur un seul calculateur, ils sont répartis de manière fixe entre les deux calculateurs d'une paire. Mais ils doivent coopérer, même quand ils sont sur des calculateurs différents, en particulier pour

⁷³ La réentrance est la propriété pour un programme (ou un sous-programme) d'être utilisable par plusieurs tâches multiprogrammées et ainsi d'éviter la duplication du programme en mémoire centrale. Elle suppose la séparation du code (qui doit rester invariant) et des données (dont une version doit être associée à chaque tâche qui utilise ce code partagé). Cette séparation n'est pas prévue dans la structure du code opération du 133.

gérer les contraintes de précédence. Il y a donc un moniteur de multiprogrammation temps réel sur chaque machine, chacun avec ses données de gestion, et les moniteurs s'informent mutuellement (de manière asynchrone) par des messages via le canal A. Ainsi lorsqu'un programme nécessite des résultats fournis par un programme qui s'exécute sur un autre calculateur, le premier programme est arrêté jusqu'à ce que les résultats du second soient disponibles.

L'architecture du système logiciel, appelé Haliotis⁷⁴, présente quatre niveaux hiérarchiques :

- 1) Le superviseur des activités et de mise en place de la configuration matérielle.
- 2) Le moniteur gérant les travaux selon priorité, urgence et synchronisme.
- 3) Le travail, ensemble de modules gérant une fonction opérationnelle. Tous les modules d'un travail sont sur un même calculateur.
- 4) Le module réalisant une étape du travail avec deux propriétés fondamentales :
 - a) un module d'un autre travail peut être un préalable de synchronisme,
 - b) l'exécution d'un module étant commencée, celle-ci peut être achevée (grâce au moniteur) quel que soit l'état d'avancement des autres travaux.

À chaque niveau, on trouve des tables de données, avec une politique d'accès respectant les niveaux hiérarchiques ci-dessus.

Pierre Tellier est embauché en avril 1965 à la CAE par Pierre Guichet qui lui confie la réalisation d'un moniteur temps réel commandé par le STCAN. Pierre Tellier, qui, à cette époque, ne connaît rien au temps réel, passe une matinée à Toulouse pour se faire exposer par un chercheur, Henri Dedieu⁷⁵, les principes d'un moniteur de multiprogrammation. Puis il adapte et étend ces principes pour réaliser le moniteur qui est livré au centre Coelacanthé en mi 1966. Il est alors détaché par la CAE au centre Coelacanthé, de mi 1966 à septembre 1969, où il est chargé du moniteur et de l'intégration des programmes sous le moniteur.

Le moniteur de multiprogrammation temps réel, réalisé par Pierre Tellier, est original, très évolué et permet de respecter les contraintes temporelles de démarrage et de fin d'exécution des travaux (dates de début et échéances) qui doivent s'exécuter sur le calculateur.

Il prend en compte la priorité fixe d'un travail (déterminée à la construction, elle définit l'importance d'une fonction), l'urgence d'un travail (fonction décroissante du temps jusqu'à son échéance, date au-delà de laquelle la fonction n'est plus utile) et le synchronisme (l'exécution d'un module est soumise à l'exécution préalable d'un autre module). L'importance d'un travail est définie par un rang de

⁷⁴ Cette architecture logicielle a été publiée dans la revue de l'AFIRO : « Denis Derville, Claude Kaiser, Yves Peirotes, Pierre Tellier. Le système Haliotis, RIRO 1,6, pp. 3-25, 1967 »

⁷⁵ Henri Dedieu a passé une thèse de 3^e cycle en 1966 à l'université de Toulouse sur la simulation d'un système modulaire de calcul.

suppression, qui indique l'ordre d'élimination des travaux au cas où les contraintes temporelles de tous les travaux demandés ne pourraient pas être respectées.

Ce moniteur se comporte donc comme un ordonnanceur pour des travaux qui ont chacun une « fourchette » d'activation, sous la forme de deux dates mises à jour (si nécessaire) à chaque activation du moniteur :

- une date d'activation au plus tôt (infinie lorsque le travail n'est pas éligible),
- une date d'activation au plus tard (une échéance absolue).

C'est grâce à ces « fourchettes » que le moniteur temps réel gère les enchaînements de tâches et les chargements dans la zone d'« overlay ». Le moniteur scrute toujours les deux premiers « clients » présents en file d'attente des travaux, file ordonnée selon l'algorithme décrit informellement ci-dessus. Le premier « client » doit toujours être exécutable sans lecture de la mémoire secondaire (son code réside en mémoire principale). C'est la scrutation du second « client » qui assure cette propriété : lorsque le code de ce dernier n'est pas présent en mémoire principale, le moniteur importe le code dans la zone « overlay » depuis la mémoire secondaire (extension de mémoire ou disque). Cette importation est elle-même vue comme un travail que se crée le moniteur.

Divers logiciels système sont réalisés par Claude Chaminadas, Jean Faure, Jean-Pierre Fargeot, Jean Le Bihan, Gérard Le Lann, Alain Pistre, Daniel Poirson, Jean-Pierre Saada. Ces logiciels assurent notamment :

la gestion des disques (les logrammes disques ne sont pas directement accessibles, seul un programme de niveau Superviseur est capable d'assurer une gestion cohérente des mémoires disques, c'est le but du programme B (document STCAN/CA/CCC, prog.3.S.1 DISK01)),

la gestion des différents canaux d'entrées-sorties (inter calculateurs, entre un calculateur et ses périphériques),

les fonctions de base du moniteur (autodiagnostic, chargement des codes non-résidants en zone « overlay », etc.),

la lecture de l'horloge,

la gestion des interruptions et des masques associés.

Pierre Tellier est aidé par Jean Le Bihan, Pierre Boullier, Daniel Poirson, Séjournet et Blanc pour les fonctions de base du moniteur. L'encombrement mémoire des fonctions de base qui sont utilisées en permanence, comme les entrées-sorties disque et le couplage des disques et des fichiers entre les deux sous-ensembles du Système (la situation tactique et la maintenance vecteurs) doit être optimisé au maximum, en utilisant toutes les ressources permises par la structure des logandes.

Alain Lemaire se voit confier la prise en main de la console Sintra et le développement d'outils de l'IHM (interface homme machine). Rappelons que la console est à balayage cavalier, que les structures des données visualisées sont en

mémoire du CAE 133, mais aussi l'image copiée sur l'écran et qu'il n'y a pas de générateur de vecteur. La moindre modification de l'écran déclenche un programme s'exécutant dans le CAE 133. La présentation de l'image sur l'écran de la console est un travail périodique qui représente une lourde charge de calcul et qui prend beaucoup de place en mémoire.

Pierre Tellier se charge de la vérification (mises au point, modifications) des différents programmes et des tests en temps réel dans la salle d'essais du Centre de Calcul Coelacanthé. Il est aidé pour l'intégration des programmes par Gérard Le Lann, Jean-Pierre Saada, Mireille Bourbotte et Michel Dubroca.

Jean-Noël Contensou et Daniel Poirson, aidés par Didier Guérin, Goubet, Schmidt et Dessaux, s'occupent des programmes de maintenance et préparent, avec l'IDT Foucher, les tests et essais à effectuer à bord du sous-marin.

Quelques chiffres à titre d'exemple

Citons quelques chiffres retrouvés pour la seule situation tactique : 117 000 mots de 15 bits dont 88 000 instructions et 29 000 mots de données ou de tables de travail.

Les noms de quelques-uns des travaux correspondants de la fonction « situation tactique » ont aussi été retrouvés et montrent l'imbrication des travaux périodiques et a périodiques.

1. Remplissage des temps morts (stabilisation de la sélection des travaux par le moniteur - lui-même travail périodique - pendant les initialisations ou certaines transitions).
2. Lecture des actions demandées à la console (messages ou demandes de service) qui vont déclencher les travaux a périodiques correspondants (travail périodique).
3. Transferts par canaux A et D (travail a périodique).
4. Remplissage du tampon Table traçante (travail périodique).
5. Présentation de la situation sur l'écran de la console (travail périodique).
6. Gestion des messages destinés au tote console (travail périodique) ; appelle le travail 18.
7. Gestion des messages destinés au tote pupitre de détection sous-marine (travail périodique) ; appelle le travail 18
8. Traitement de l'action GCO2-D (écoute microphonique) (travail a périodique).
9. Commande et lecture du GCO2-E (écoute automatique) (travail périodique).
10. Traitement de l'action DUUX (télémetre acoustique) (travail a périodique).
11. Traitement de l'action Sonar appelé par le travail n°2 (travail a périodique).
12. Traitement de l'action 1 du pupitre de détection sous-marine (travail a périodique).
13. Traitement de l'action 1 de la console (travail a périodique).
14. Liaison des programmes tactiques avec le recalage astral (travail périodique).
15. Contrôle opérationnel n°1 (travail a périodique), pour tests.
16. Contrôle opérationnel n°2 (travail a périodique).
- 17 Traitement de l'action ARUR (détecteur de radar) (travail a périodique).
18. Compositions des messages à destination des totes (travail a périodique).
19. Constitution des historiques et rangement sur disque (travail périodique).
20. Liaison avec l'engagement tactique (travail périodique).
21. Liaison avec l'azimétrie et transmission de données entre calculateur menant et calculateur mené (travail périodique).

Génie logiciel

Rappelons que le calculateur CAE 133 n'a pas de protection mémoire. Donc tout programme est critique, car une erreur dans n'importe quel programme, quel qu'il soit, peut se propager dans toute la mémoire et entraîner la panne de toute l'application. D'où l'importance de la qualité du logiciel et l'audace qu'il y a à faire confiance à nos programmes. C'est pourquoi, pour ne pas être à la merci d'une panne de l'ordinateur ou de ses programmes, les sous-mariniers gardent toujours la possibilité de naviguer en mode manuel. Seul le PVA ne peut fonctionner qu'avec une conduite asservie par ordinateur, mais on peut faire un point Loran en mode manuel.

Le terme « génie logiciel » n'existe pas à l'époque, mais le STCAN (service technique) a une longue tradition d'expertise technique, de qualité et de gestion de gros projets.

Le PERT⁷⁶ est employé pour la construction du sous-marin et l'installation des matériels. Toutefois il n'est pas utilisé pour suivre notre développement logiciel, car celui-ci n'est pas critique, le sous-marin pouvant remplir son rôle opérationnel sans les fonctionnalités nouvelles que l'on apporte. Claude Kaiser se demande encore aujourd'hui si, au départ, l'état-major a crû que le projet serait mené à terme. Le Loran et le Transit sont là pour faire le point et le PVA n'est qu'un secours. Et les sous-mariniers se sont passés jusque-là d'un système informatisé de traitement de données pour naviguer. On était un peu « la danseuse du STCAN ».

La « boxologie » (qui s'épanouira par la suite avec divers avatars comme SADT, ... , ou encore UML) sévit déjà naturellement chez les ingénieurs du Génie Maritime : découpage en étapes, modules, et interconnexion de ces modules. On en parle, on le fait implicitement, mais on ne l'automatise pas. Car on ne peut pas, à l'époque, traiter cela par ordinateur (l'informatique n'a pas encore atteint ce domaine où le traitement graphique est important), et tout doit se faire à la main, sans aucun contrôle automatique (méthodologique, syntaxique ou sémantique).

La notion de vérification existe et est couramment pratiquée pour la commande analogique ou à relais, sous la direction de l'ICGM Chaix. Mais ce qui était possible pour un schéma en logique séquentielle à relais ne l'est pas pour des programmes.

Une documentation doit être disponible sur le bateau et donc livrée aux marins. Le STCAN sait le faire pour le matériel. Pour la programmation, il faut inventer. Jean-Noël Contensou développe des normes de présentation de la documentation à faire respecter par les sociétés spécialisées auxquelles le STCAN fera ensuite appel. Mais ce seront les sous-mariniers eux-mêmes qui réaliseront en grande

⁷⁶ Le PERT a été créé en 1956 à la demande de la Marine Américaine. C'est une technique de gestion de projet qui permet de repérer la dépendance des tâches et de procéder à leur ordonnancement. C'est un outil de planification.

partie la documentation qui leur sera utile à bord.

Des notions comme la recette, les tests, la préparation des essais à bord et la maintenance sont des éléments du métier de l'architecture navale. Elles sont naturellement appliquées aux programmes.

Denis Derville arrive au centre en 1964 comme soldat de 2^e classe de l'Armée de l'Air, puis est embauché à la CAE, par Pierre Guichet, à la fin de son service militaire. Il est l'âme du développement du logiciel et coordonne les travaux de programmation. Denis est un personnage très sympathique et très dynamique. Il est d'un contact facile et direct. Il montre une aptitude assez remarquable à entraîner nos petites équipes de développement. Pendant une très grande partie de leur affectation au centre, Gérard Le Lann et Jean-Pierre Saada partagent le bureau de Denis Derville, bureau jouxtant celui de Pierre Tellier et Yves Peirotes. Cette disposition favorisa grandement le développement et la mise au point de certains logiciels système (voir à ce propos l'anecdote {Quand un programme ne marche pas, ce ne peut être à cause du « hard »}).

Le travail de programmation est organisé très en détail. Claude Ducarouge a retrouvé dans son grenier une note du 16 novembre 1966 rédigée par Denis Derville pour définir les méthodes et les normes de programmation à adopter au Centre de Calcul Coelacanthé. Ce document comporte un texte synthétique de 15 pages accompagné de 70 pages remplies par 18 annexes avec des listes de documents existants ou à faire, des schémas et des exemples. On y trouve d'abord le fonctionnement du centre, avec le planning d'utilisation des matériels, la ventilation des travaux à faire au CPM voisin, des travaux à faire par les opérateurs ou les programmeurs. Puis une seconde partie donne une typologie des programmes (opérationnels, essais et simulation, service, recette et maintenance), leur numérotation, et les études et les documents qui doivent les accompagner. La normalisation des organigrammes y est définie. Une troisième partie concerne la mise au point avec un protocole de vérification et d'essai normalisé. On y trouve, souligné dans le texte : *« Dès que l'on obtient des résultats satisfaisants, le programme doit être essayé dans des conditions similaires aux conditions opérationnelles et par un utilisateur différent des personnes ayant participé à l'étude et à la mise au point. C'est pourquoi cet essai sera effectué par un spécialiste du service Étude et Organisation, en liaison avec les gens du service opérationnel. »* Les programmes mis au point sont visés par un responsable avant d'être transmis pour des essais d'intégration. Cette partie décrit aussi la gestion des divers supports. La quatrième partie est consacrée à la recette, à la maintenance des programmes et au contrôle de l'homogénéité des documents. Une personne, Fourrat-Besson, est chargée de contrôler les recettes des programmes.

Une étude, qui peut être déclenchée par une spécification opérationnelle extérieure au CCC, passe par 4 stades. Au premier on prépare la spécification, un organigramme général et les relations avec les autres programmes. Le second décrit le découpage en modules et leurs interactions, les données associées à chaque module, les sous-programmes et logigrammes utilisés, les relations avec le

moniteur et le superviseur. Le troisième comprend l'écriture du programme, le listing et des commentaires liés à la réalisation du programme, la liste et la description des jeux d'essais. Le stade 4 est constitué des fiches d'essai à bord et des procédures de maintenance.

Ce travail est accompagné de réunions de spécification et de coordination.

Vu le niveau scientifique des acteurs, chacun accomplit les 4 stades de l'étude dont il a la responsabilité et est à la fois concepteur et programmeur⁷⁷.

Cette méthode de travail est relativement innovante pour l'époque. Elle n'est pas enseignée dans les Écoles d'ingénieur suivies par les membres du CCC. Mais nous sommes conscients du coût des erreurs de programmation, des retards importants qu'elles peuvent entraîner, des difficultés qui sont rencontrées par certains grands projets. Dans la note 29 STCAN/CA/KCR de mai 1967 rédigée par Claude Kaiser (retrouvée grâce à Claude Ducarouge), on cite, pour la réalisation de systèmes de « time sharing », de gros retards d'Univac sur le 1108, d'IBM sur le 360/67, et l'abandon de General Electric. On insiste aussi sur l'importance de la programmation modulaire, sur la nécessité de désigner les variables et les instructions par des noms symboliques (On y lit : « *Il est impensable de travailler encore en octal* »). On rappelle l'importance de la recette avec les utilisateurs. Cette méthode de travail résulte d'une réflexion et d'une démarche rationnelle conçue par et pour des ingénieurs⁷⁸ qui savent, contrairement à ce qui sera hélas proclamé par certains, que « *programmer, ce n'est pas facile* ». La méthode de travail est affinée au cours du temps et à la suite de l'expérience acquise. Ainsi la documentation de recette des programmes opérationnels est redéfinie en 1968 par les notes 16 et 26 CA/CJ du CCC.

Denis Derville donne l'exemple en 1964 en rédigeant la première étude :

Étude n°1 CA/CSM syntaxe du langage CAE 130 (soldat de l'armée de l'air, D. Derville) 18 décembre 1964.

Quelques-unes des études faites pour le PVA et pour la situation tactique, et qui ont été retrouvées, ont été citées plus haut.

Les logrammes de base fournis par le constructeur américain ne sont pas tous corrects. Ils ont été fournis par la société Ramo Wooldridge sous forme de cartes perforées. Il manque parfois une ou deux cartes, donc les lignes de code correspondantes manquent. Un programmeur de la CAE, Kopf, vient passer quelque temps au Centre de Calcul Coelacanthé pour les réécrire, les optimiser et les mettre au point.

Denis Derville améliore le moniteur en structurant en listes d'éléments de 5 mots

⁷⁷ On retrouve cette organisation où c'est la même personne qui conçoit, programme et fournit la documentation, dans les centres de recherche, comme par exemple l'INRIA et le CERN.

⁷⁸ Claude Ducarouge s'est souvenu de cette méthode de travail et s'en est inspiré dans sa vie professionnelle ultérieure.

les données dynamiques issues des senseurs, et en les regroupant dans une zone de mémoire réservée plutôt que d'affecter une zone de longueur fixe à chaque senseur.

Rappelons que le langage Fortran et le langage Atalante sont utilisés pour certains aspects de la situation tactique. Le langage Atalante est une fourniture de la CAE (notice CAE/RT/1445). Un système, dit système Atalante, est réalisé par CAE (CAE/RT/1499) pour pouvoir utiliser la machine Univac 1004 du CPM pour créer une bande magnétique à partir de cartes perforées et pour imprimer des listings à partir de bande magnétique écrite par un CAE 133 sur lequel est compilé un programme Atalante. Vers 1967-1968, on a pu aussi utiliser l'Univac 1108 du CCSA pour compiler certains programmes Fortran

Tardivement, fin 1967, un CAE 510 est récupéré au STCAN. Il comprend un lecteur de cartes perforées et un dérouleur de bandes magnétiques. Il va être utilisé pour assembler les programmes destinés au CAE 133 et les écrire sur une bande magnétique qui est ensuite lue par le CAE 133. Le programme d'amorçage (bootstrap) du CAE 133 est complété pour que les programmes puissent être amorcés depuis une bande magnétique.

Afin de supprimer les temps d'attente pour corrections des programmes en cours de mise au point, corrections confiées au CPM, un programme de service est développé par Gérard Le Lann. Il permet de corriger directement les programmes sur bandes magnétiques (échangées avec le CPM) – document STCAN/CA/CCC prog.12 R.

Jean Le Bihan, en concertation avec Denis Derville, réalise des outils logiciels d'aides aux développeurs des programmes opérationnels.

L'ensemble baptisé PAMAP (Programmes d'Aide à la Mise au point de Programmes) comprend entre autres :

- un outil de gestion des bibliothèques (sur bandes magnétiques) de programmes des « programmeurs opérationnels »,
- un logiciel d'aide à la mise au point des programmes logandes-logrammes à partir de la console de la CAE 133,
- un « désassembleur » qui était plutôt un « ré-assembleur » qui permettait de ressortir, à partir du contenu de la mémoire vive, le texte du programme en logandes.

D'autres programmes de service sont réalisés sous la direction de Denis Derville, comme le programme ESVAR (gestion de tableaux de variables), qui prend la suite du programme SMAE défini avant l'utilisation des unités de bandes magnétiques – document STCAN/CA/CCC prog.12 ESV2.

Par ailleurs une aide logistique importante est mise en place par STCAN/CA/SM en créant le Service d'exploitation du CCC dirigé par l'IDT Bourdareau. Il est assisté par 3 chefs de travaux, Bellour, Lancien et Le Stunff, par une équipe d'une dizaine de techniciens Marine ou détaché par la CAE comme Daugé, et par des

secrétaires, Madame Goussé (« tante Jeanne »), Evelyne Papiot, « Martine ». Il gère et assure la maintenance des calculateurs du centre de traitement des données, des appareils périphériques et des simulateurs et apporte une aide pour la nomenclature et le stockage des supports des programmes et pour la rédaction des documents produits par le CCC. Il est aidé par des ingénieurs de l'École Polytechnique Féminine, Annie Labille et Françoise Gaussorgues, personnel contractuel du STCAN.

Une note de l'ICGM Louis Pasquier définit l'organigramme du CCC en 1968. Il est alors dirigé par l'IGM Peirottes, avec 4 chefs de service, Pierre Tellier, l'IGM de Guillebon, l'IGM Contensou et l'IDT Bourdareau. Il y a environ vingt-cinq personnes engagées dans les études et la programmation et assistées par la quinzaine de personnes du service exploitation. Le Centre de Calcul Coelacanthé occupe alors au rez-de-chaussée du 16 rue Émeriau une quinzaine de pièces pour les bureaux et le centre de traitement des données.

Il faut aussi signaler la qualité des rapports humains, l'ambiance de travail entre les techniciens, les secrétaires, et les programmeurs, la formation des personnels du centre ou de marins, la cohabitation cordiale avec les membres du Centre de Programmation de la Marine qui développent le système SENIT. Pierre Guichet, le directeur de la division militaire de la CAE (puis de la CII) qui fabrique les CAE 133 et les armoires électroniques d'interface avec les périphériques suit de très près l'aspect technique du projet. Le STCAN lui commande aussi la réalisation de quelques programmes de service ou lui demande de mettre du personnel à disposition du CCC. C'est Pierre Guichet qui embauche Denis Derville, Pierre Tellier et d'autres à la fin de leur service militaire pour qu'ils puissent continuer à travailler au Centre de Calcul Coelacanthé. En dehors de la CAE, le STCAN fait appel à la SARST (Société Auxiliaire de la Recherche Scientifique et Technique) dont les bureaux se trouvaient rue de Grammont à Paris, et qui était à l'époque une « astuce » pour recruter de jeunes ingénieurs avant ou après leur service militaire comme EOR (c'était en réalité un « marchand d'hommes »). Et c'est l'IRIA (devenu depuis l'INRIA) qui embauche Gérard Le Lann, Alain Lemaire et Jean-Pierre Saada à la fin de leur service militaire pour qu'ils puissent travailler au Centre de Calcul Coelacanthé d'avril à octobre 1969.

Quelques documents concernant le génie logiciel

Quelques documents ont été retrouvés par Claude Ducarouge :

STCAN/CA/CCC prog.0.R du 16 novembre 1966. « Normes de programmation du Centre de Calcul Coelacanthé » (Denis Derville).

STCAN/CA/KCR 29 du 31 mai 1967, note destinée à préciser au SCTI de quel système d'exploitation aurait besoin le groupe CA pour utiliser les calculateurs du plan calcul militaire. « Système d'exploitation des calculateurs » (Claude Kaiser).

STCAN/CA/KCR du 15 novembre 1967. « Programme REDATA » (Claude

Kaiser).

STCAN/CA/CJ 16 de janvier 1968. « documents de recette d'un programme » (C.J.).

STCAN/CA/CJ 26 de février 1968. « documents de recette d'un programme. Modification de la note n°16 CA/CJ » (C.J.).

STCAN/CA/SM ordre de section n°14 du 7 février 1968. « Organisation du Centre de Calcul et d'Essais Coelacanthé » (ICGM Pasquier).

D'autres documents conservés par Gérard Le Lann :

STCAN/CA/CCC prog.12.R de février 1967. « MOPSY, Modification des programmes symboliques enregistrés sur bandes magnétiques » (G. Le Lann).

STCAN/CA/CCC prog.12.ESV2 de juin 1967. « ESVAR, Programme d'entrée-sortie de tableaux de variables » (G. Le Lann).

STCAN/CA/CCC prog.30 N – OIV de septembre 1967. « Bibliothèque des opérateurs d'Iverson » (G. Le Lann).

STCAN/CA/CCC prog.3.S.1 DISK01 de février 1968, « Programme B », EOR G. Le Lann.

Les essais

Les essais du PVA.

L'IDT Alain Luciano passe les années 1965 et 1966 au Centre de Calcul Coelacanthé. À son tour, il forme l'équipe de techniciens toulonnais qui va participer aux essais du prototype de PVA sur le SM Gymnote, plateforme expérimentale pour les engins M1, la centrale inertielle de navigation, le transfert d'Azimut et le PVA essentiellement, à Toulon en 1967 et 1968.

L'IDT Bénéteau est chargé de l'installation mécanique du PVA et de sa mise en œuvre hydraulique à bord du bâtiment. Alain Luciano assure la partie commande électronique et informatique du PVA avec l'aide précieuse de Christian Imbert, embauché pour cela par la CAE.

La partie optique du PVA est assurée localement par l'ISC Cérès de l'atelier d'optique de la DCAN Toulon, sous la houlette de l'IGM Bertrandias du STCAN (Section Optique) et avec le concours de la SOPELEM constructeur de l'ensemble mécanique et optique du PVA.

Bénéteau, Cérès et Luciano forment une équipe solide pour la mise au point de ce nouveau système sous la fêrule, pour le moins énergique, de l'IPGM Marc Menez, Ingénieur chargé du SM Gymnote.

Et un soir de juillet 1968, le concept de Système de Recalage Astral est validé. Par ciel clair, le PVA installé sur le SM Gymnote vise sa première étoile et calcule sa

première droite de hauteur.

Le sous-marin Gymnote permet encore d'autres essais du PVA à partir d'août 1968 à Lorient⁷⁹.

L'IDT Guy Bizien se forme d'abord au Système de Recalage Astral et va à Toulon, de mai à juillet 1967, participer aux essais sur le Gymnote. Puis il va à Cherbourg en 1969 et 1970, à la fin de la construction du Redoutable, et arrive non sans mal à trouver une place dans les plannings pour effectuer la mise au point et les essais du PVA sur le sous-marin. En 1970, le Redoutable quitte Cherbourg et Guy Bizien le suit à Brest pour continuer les essais en mer du PVA. Le planning très chargé laisse peu de créneaux au PVA, il permet quand même de faire quelques points qui valident le système dans son emploi opérationnel et donnent des idées de modifications pour l'améliorer.

Les essais de la situation tactique sur le Redoutable.

En octobre 1968, l'IGM Jean-Noël Contensou part à Cherbourg pour les essais des fonctions tactiques. Il se trouve souvent pris en sandwich entre les essais faits par les fournisseurs et ceux qui sont faits par les marins.

Certains programmeurs se déplacent à Cherbourg. Ainsi, par exemple, Daniel Poirson y effectue des tests logiciels en vraie grandeur sur le sous-marin à quai. En septembre 1969, avant de quitter le centre Coelacanthé, Pierre Tellier va en mission à Cherbourg avec un disque contenant la dernière mise à jour du système réalisée sous sa responsabilité et l'apporte au LV Pelliard⁸⁰, premier chef du service de calcul du Redoutable.

De décembre 1970 à mai 1971, Guy Bizien embarque six fois pour une semaine d'essais en mer, tant pour le PVA que pour la situation tactique.

Pendant la première période d'essais à la mer du Redoutable (de juin à novembre 1969), le commandant Bisson passe de nombreuses heures devant la console tactique à tester le système de traitement des données : assez rapidement, les sous-mariniens se rendent compte d'une lourdeur certaine due au fait qu'avant toute introduction de donnée, il faut envoyer un message au calculateur pour lui indiquer à quel but on l'affectait (c'est la contrainte du « bien pointé »). Cela se révèle moins contraignant lors des patrouilles opérationnelles, car les bruiteurs sont rares dans les zones où est déployé le sous-marin, mais de toute façon les sous-mariniens continuent à travailler avec la règle CRAS sur la table traçante comme sur les sous-marins diesels.

Les essais de la *Situation Tactique* n'enthousiasment pas les marins qui doivent pianoter longtemps pour obtenir une situation qu'ils ont déjà à la table traçante. Les calculs d'*azimétrie*, confrontés au bruit des mesures réelles, ne sont pas très

⁷⁹ On doit, à cet effet, percer un trou dans le plafond en béton de l'ancienne base sous-marine allemande.

⁸⁰ Lieutenant de Vaisseau Pelliard, École navale et ingénieur ESE année 1964

fiables. Le programme *d'aide à la pesée* du sous-marin n'est pas vraiment utilisé, car en pratique, l'expérience des « maîtres de central », acquise au fil des années sur d'autres sous-marins, leur permet de résoudre le problème tout aussi bien et aussi rapidement sinon plus. Et durant la patrouille, les causes de variation relativement peu importantes (changement d'immersion entraînant une variation de volume donc de poussée, élimination des eaux usées et des ordures...) leur sont bien connues.

Le bouillon de culture

Les contacts sont assez nombreux car la veille scientifique est dans la tradition du STCAN.

L'IPGM Pierre Moulinier, spécialiste au STCAN des asservissements et de la conduite d'armes, chargé des études du système d'armes Masurca, lance l'étude de l'asservissement analogique du PVA et nous aide quand c'est nécessaire.

Le PVA nous conduit à étudier la théorie toute récente des asservissements échantillonnés, dans le livre de Ragazzini et Franklin et dans le polycopié du cours de Sevely à Toulouse sur les systèmes asservis échantillonnés⁸¹.

On n'hésite pas à prendre des contacts quand c'est nécessaire et l'ICGM Boucher nous y aide par des contrats et conventions.

M. de Barbeyrac, de la SESA, contribue à définir, avec Michel de Guillebon et Georges Imbert, les paramètres de la fonction de transfert échantillonnée du PVA.

Un contrat demande à Jean Kovalevsky au Bureau des longitudes de nous fournir, sur disque, les éphémérides des astres visés par le PVA.

Pour l'étude de l'azimétrie, la SESA avait déjà fait des études de 1963 à 1966. Un nouveau contrat avec la SESA en 1968 permet d'avoir l'aide de Jacques Arnould et de son équipe. Un contrat est passé en octobre 1968 avec le laboratoire CERT-CERA de l'école supérieure d'aéronautique.

Les scientifiques du contingent ont reçu des cours d'informatique et de programmation pendant leur formation. De plus, ils ont pour la plupart fait des stages en entreprise au cours de leurs études. À titre d'exemple, Gérard Le Lann a appris à programmer le Gamma 60 de Bull en 1963 pendant un stage d'été à la compagnie d'assurances UAP (ancêtre de AXA). Les IGM ont suivi le cours de Henri Boucher à l'ENSGM, mais pas fait de programmation. Seuls Claude Kaiser et Yves Peirottes en ont fait pendant leur complément de formation à Grenoble ou à Berkeley et Michel de Guillebon a effectué un stage chez IBM à la sortie de l'X. Les IDT ont une formation en électronique mais pas en programmation.

Les acteurs connaissent les machines utilisées pendant leurs études : CAB 500, IBM 650, IBM 7044 et 7090, CAE 510, et leur programmation en assembleur,

⁸¹ À cette occasion, Michel de Guillebon apporte une amélioration à la formule du développement limité de la fonction de transfert échantillonnée $G(Z)$ qui sera reprise dans une nouvelle édition du cours.

Algol 60 ou Fortran 2.

L'informatique évolue très rapidement à cette époque. On voit apparaître de nouvelles machines comme le Control Data 6600, le Gamma 60 de Bull, la série IBM 360, l'IBM 360-67, l'IBM 360-91, la Pallas, la Burroughs B5000. On apprend le nom de quelques grands systèmes de l'époque, le système SAGE de surveillance aérienne des USA, le « Naval Tactical Data System » (NTDS) de la marine US, sans pouvoir en savoir plus car ils sont couverts par le secret industriel ou militaire⁸². C'est aussi l'époque de la naissance des systèmes en temps partagé comme CTSS, MTS et Multics, du développement de la multiprogrammation, de la mémoire virtuelle, de la gestion des processus concurrents, de nouveaux systèmes temps réel. On prend aussi conscience du coût des erreurs de programmation, de l'importance du style et des méthodes de programmation et l'on suit la naissance du « Software Engineering ».

Ces développements de l'informatique et de l'automatique sont suivis par cette population jeune, curieuse de les connaître et de les appliquer quand c'est possible.

Ainsi Denis Derville essaie de développer une grammaire BNF⁸³ (Backus Naur Form) pour la syntaxe des logigrammes et logandes des CAE 130 et 133.

Jean-Noël Contensou fait un exposé sur le langage APL avec l'espoir de pouvoir s'en servir pour une documentation synthétique. À sa demande est créée une bibliothèque des principaux opérateurs d'Iverson (Kenneth Iverson⁸⁴ est à l'origine de l'APL) sous forme de logigrammes, destinés à être utilisés dans les programmes de maintenance des fonctions du CTD (cf. document STCAN/CA/CCC prog.30 N – OIV).

Claude Kaiser garde des contacts à Grenoble, en particulier avec Louis Bolliet. Claude Kaiser et Pierre Tellier suivent en 1966 les journées d'études AFIRO sur l'utilisation des ordinateurs à distance en temps réel et en temps partagé. Claude Kaiser suit aussi très régulièrement le séminaire structure des machines, organisé par Henri Boucher dans le cadre de l'AFIRO puis AFCET, et il découvre ainsi les machines nouvelles qui apparaissent sur le marché français. Jean-Noël Contensou et Yves Picot participent à un groupe de travail AFIRO sur la sûreté de fonctionnement et la sécurité des systèmes. Le groupe définit ces notions, leurs mesures, les méthodes et moyens pour les appliquer et souhaite que des recherches s'engagent sur ces notions⁸⁵.

⁸² Sur le système SAGE, Henri Boucher a rédigé en 1960 une brochure de 150 pages, tirée à l'ammoniaque à l'ECAN Ruelle. (cité par Henri Boucher dans l'article « L'informatique dans la Défense » présenté au colloque Histoire de l'Informatique, à l'INPG Grenoble en 1988). Cette brochure, de diffusion limitée, ne nous avait pas été communiquée.

⁸³ La BNF, métalangage permettant de décrire de façon formelle les règles syntaxiques, en particulier des langages de programmation, a été conçue par John Backus et Peter Naur lors de la conception du langage Algol 60.

⁸⁴ Kenneth E. Iverson, *A Programming Language*, John Wiley and Sons, (1962)

⁸⁵ Jean-Noël Contensou, Yves Picot. Systèmes : sûreté de fonctionnement et sécurité RIRO 2,1, pp.3-48, 1968.

Les techniciens (plus particulièrement Lancien) suivent les cours télévisés de Paul Namian, professeur au CNAM.

Des cours sont mis en place en interne pour partager ces nouvelles connaissances et pour former les divers publics qui fréquentaient le centre. Ce fut certainement une retombée des investissements alors réalisés. Nous avons retrouvé quelques-uns de ces cours publiés par l'Établissement des Constructions et Armes Navales (ECAN Paris).

Un solide cours de recyclage en statistique, avec corrigés, de 147 pages est enseigné par l'IGM Renault de février à avril 1967.

Le cours de théorie de l'information, rédigé par Claude Kaiser en 1967, comprend 161 pages consacrées à la théorie du codage, aux théorèmes de Shannon et aux codes détecteurs et correcteurs d'erreur. Ce cours sera aussi enseigné à l'ESE de 1966 à 1969.

Le cours sur les systèmes d'exploitation des calculateurs numériques par Claude Kaiser, rédigé en 1967, donne une idée du niveau de connaissance du Centre de Calcul Coelacanthé. On y trouve la présentation des résultats récents comme la pagination, la segmentation, les registres associatifs, la mémoire topographique, la multiprogrammation. On y fait état de systèmes à partage de temps comme le projet Mac et Multics, comme l'IBM 360/67. On y présente aussi les piles, les listes et les structures répaties.

En réalité cette communauté d'ingénieurs avec de solides racines scientifiques est une sorte de « Think Tank ». Mais elle ne s'en rend pas compte. Chacun fait son travail sérieusement, mais sans se prendre au sérieux et sans se croire un « gourou » de l'informatique.

En 2010 l'Ingénieur Général de l'Armement Alain Luciano se souvient: « *J'ai gardé de mon passage au Centre de Calcul Coelacanthé, en 1965/1966, un souvenir impérissable. L'imagination et le travail sérieux et pointu de quelques jeunes ingénieurs sortant à peine de leurs écoles, ESE, Arts et Métiers, ENSEIHT, ... , ont permis de réussir brillamment les études, recherches et développement d'un sous-ensemble sophistiqué - pour l'époque - d'un programme majeur d'Armement. Et tout cela dans une ambiance quasi-ludique!* ».

Éléments de bibliographie contemporaine

[CAE] Manuel de référence de l'unité centrale CAE 133, note technique CII 1493.

[Arsac 1967] Jacques Arsac. La conduite des ordinateurs, 270 p., Dunod 1967.

[Bolliet 1966] Bolliet, Louis. Utilisation des ordinateurs à distance en temps réel et en temps partagé. Journées d'études AFIRO, Grenoble, 29 mai - 3 juin, 1966. Dunod 1967 Collection Monographies d'Informatique.

Extrait du Bulletin des Bibliothèques de France dans
<http://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-1969-04-0275-001.pdf>

893. - Utilisation des ordinateurs à distance en temps réel et en temps partagé. Journées d'études AFIRO 1966. Organisées à la Faculté des sciences de Grenoble sous la présidence de L. Bolliet. Paris, Dunod, 1967. 24 cm, XII-288 p. (Association française d'informatique et de recherche

opérationnelle.2.Monographies d'informatique.)

L'ouvrage est divisé en 4 parties et comporte 13 contributions : la première partie (Pouzin et Bolliet) est un exposé synthétique sur le traitement en temps réel et en temps partagé; la deuxième partie regroupe trois exposés consacrés respectivement au système IBM/360 modèle 67, au système GE 645 et au système UNIVAC I108; la troisième partie comporte cinq exposés consacrés à divers systèmes de programmation réalisés en France (sur ordinateur M 40 BULL, CAE 510, IBM STRETCH); la quatrième partie passe en revue trois applications particulières (un système militaire, un système de contrôle de la navigation aérienne, un système dans une compagnie d'assurances).

Ouvrage très intéressant, permettant de faire le point dans un domaine à la fois difficile et en pleine évolution. Analyse de Jacques HEBENSTREIT.

P.Brinch Hansen and P. Kraft. The RC 4000 real-time control system, 1967.

Codd E.F. Multiprogram Scheduling. CACM 3(6, 7), 1960.

Dijkstra E.W. Cooperating sequential processes, in F. Genuys editor, Programming Languages : NATO advanced Study Institute, pages 43-112, 1965.

Dijkstra E.W. The multiprogramming system for the EL X8 THE, 1968.

[Flynn 1967] Michael Flynn and Donald MacLaren. Microprogramming revisited. ACM National Meeting 1967. Le TRW 133 apparaît en référence 15.

Lampson B.W. A scheduling philosophy for multiprocessing systems CACM 11(5) 1968.

Manacher G.K. Production and stabilization of real-time task schedules. JACM 14(3), 1967.

Naur Peter, Randell Brian. Software engineering: Report of a conference sponsored by the NATO Science Committee. (7-11 October 1968). Garmisch, Germany: Scientific Affairs Division, NATO 1969.

[Ragazzini 1962] J.R. Ragazzini et G.F. Franklin. Les systèmes asservis échantillonnés, Dunod 1962. Original en anglais en 1958.

Saltzer J.H. Traffic control in a multiplexed computer system, MIT thesis 1966 (Multics).

[Sévély 1963] Y. Sevely. Systèmes de commande à données échantillonnées. Cours ENSEEHT, 170 p. 1963.

Nos plus proches voisins

Nous avons comme voisins le Centre de Programmation de la Marine qui réalise le Système SENIT, un projet du STCAN de plus grande ampleur et de plus grande importance pour la Marine Nationale, avec des équipes conséquentes (ICGM Pierre Thellier, ICGM Alain Chaverebière de Sal, IPGM Jacques Buzenet, qui leur succède à la direction du CPM, IGM Jean Bourgne, IGM Jean-Raymond Abrial, et de nombreux ingénieurs de la société ECA Automation). Ce projet, commencé plus tôt que le Coelacanthé, concerne l'équipement des bâtiments de surface, plus nombreux que les sous-marins, et il a donc une bien plus grande visibilité dans la Marine Nationale. Le Centre de Calcul Coelacanthé fait artisanal à côté de la « task force » du SENIT (« des seigneurs » selon l'expression d'Alain Luciano). Symbole ou hasard (ou simplement parce qu'installés plus tard), les bureaux du Coelacanthé sont au rez-de-chaussée, ceux du Centre de Programmation de la

Marine (Sénit) sont au 1^{er} étage⁸⁶ ! Nous avons utilisé le lecteur de cartes perforées, l'unité de bande magnétique et l'imprimante rapide de leur Univac 1004.

La SEREB utilise les CAE 133 et l'architecture du centre de traitement des données du sous-marin pour le lancement des engins de la force de dissuasion. Le secret militaire et le cloisonnement des équipes de développement fait que nous n'avons aucun contact avec la SEREB, bien que les développements informatiques sur le CAE 133 soient réalisés à la division militaire de CAE-CII. Techniquement, le lancement des engins est un processus séquentiel dont la programmation ne demande pas de découpage en tâches parallèles ni de moniteur d'ordonnancement temps réel.

Évaluation critique

Le bilan scientifique et technique

Certains aspects scientifiques sont datés, tout particulièrement l'IHM (Interface Homme machine), limitée par la puissance de calcul et le coût de la visualisation. Toute l'informatique de l'époque en est au même point.

Parmi les aspects positifs, on retient plus particulièrement :

- La confrontation quotidienne et approfondie aux contraintes temporelles strictes, comme la durée, le déterminisme, l'échéance, l'importance d'un programme, nous permet d'acquérir une culture solide sur le temps réel, ce qui sera un atout pour nos carrières ultérieures. Par exemple, ces connaissances théoriques et pratiques sur le temps réel serviront à Gérard Le Lann pour entreprendre des travaux de recherche sur l'informatique temps réel à l'INRIA, notamment sur les réseaux locaux temps réel (1982-1990)⁸⁷.
- Bien que les contraintes de temps et de place nous obligent à réduire au maximum la taille et la durée d'exécution des programmes, nous gardons le souci de ne pas devenir prisonnier du langage machine. Avant de programmer en langage machine, on établit toujours des notes d'études préalables. Quand c'est possible, on utilise des langages de haut niveau comme le Fortran ou le langage Atalante. On utilise une grammaire BNF pour présenter la grammaire des logandes et des logrammes. On impose une démarche rationnelle et systématique, une méthode de travail qui s'apparente à ce que sera plus tard le génie logiciel.
- Les baies d'électronique permettant de gérer l'architecture matérielle doublée ont

⁸⁶ Mais l'équipe Haliotis fut elle aussi installée plus tard au 1^{er} étage !

⁸⁷ Par un de ces curieux effets boomerang que nous réserve parfois l'histoire, ce sont les résultats de ces travaux qui furent retenus par le CPM en 1983 pour la définition du réseau local embarqué destiné au PAN Charles-de-Gaulle (initialement appelé Richelieu). Contre la « mode » de l'époque (les bus à jeton), ce fut la variante déterministe du protocole Ethernet qui fut choisie par le CPM et, à sa demande, brevetée par l'INRIA, dans les pays OTAN. Les bus à jeton ont disparu depuis longtemps, les Ethernets pullulent. Un grand bravo est dû aux IGM qui firent les bons choix à l'époque (note de Gérard Le Lann).

été réalisées par la CAE et ont demandé de belles études. À l'époque, seuls quelques systèmes américains, comme le système SAGE ou les systèmes dédiés aux missions spatiales de la NASA⁸⁸, sont à architecture redondante. Mais, à part Henri Boucher⁸⁹, nous ne disposons alors d'aucune source d'information sur ces projets⁹⁰.

- Le moniteur temps réel est original et très en avance, y compris sur les publications scientifiques internationales qui viendront plus tard. Malheureusement, la publication de l'article sur ce moniteur et sur Haliotis a été faite en 1967 dans une revue nationale sans aura internationale. Elle est donc restée inconnue de ceux qui à l'époque développaient l'ordonnancement temps réel à priorités et à échéance, comme par exemple Manacher G. K. « Production and stabilization of real-time task schedules. JACM 14(3), 1967».

L'un des articles les plus référencés dans le domaine date de 1973 : Liu et Layland, « Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment », JACM 20(1) 1973. Néanmoins, les deux algorithmes décrits (l'un par priorités fixes, l'autre par échéances) sont analysés pour des tâches à arrivées périodiques uniquement, et sont de type préemptif (ce qui n'est pas le cas des travaux ordonnancés par le moniteur Haliotis). La prédiction des performances en non-préemptif pose des problèmes d'analyse combinatoire de complexité bien plus grande que lorsque l'on postule la préemption.

Et puis le moniteur n'a pas fait l'objet d'une instrumentation qui aurait permis de savoir quels paramètres du moniteur étaient primordiaux et lesquels étaient secondaires pour le respect du temps réel, ce qui aurait peut-être permis de réduire le temps de calcul de l'ordonnancement.

Ce sera beaucoup plus tard⁹¹ que ce moniteur, et sa notion de rang de suppression de travaux, serviront d'inspiration pour des recherches faites au CNAM sur la

⁸⁸ voir <http://history.nasa.gov/computers/Epilogue.html> : « Ground systems always had an active backup. On-board systems acquired them as size and performance improvements made it possible. The use of computers running in parallel, working on the same calculations, made necessary the development of redundancy management techniques.

⁸⁹ Henri Boucher connaissait le système SAGE et il a pu s'inspirer de son architecture où chaque site du réseau comprenait deux calculateurs, l'un d'eux actif, l'autre en « standby ». Mais on n'avait pas d'information sur le logiciel de sauvegarde, de reprise et de gestion de la redondance, ni même sur son existence.

⁹⁰ Le développement commercial de logiciels de sauvegarde, de reprise et de gestion de la redondance ne se fera que 10 ans plus tard (vers 1976 apparaîtra le système « Non Stop » de la société Tandem).

⁹¹ L'ordonnancement temps réel en présence de surcharge ne fera l'objet de publications qu'à partir de 1986.

[1986] C. D. Locke. Best-Effort Decision Making for Real-Time Scheduling. PhD thesis, Computer Science Dept., Carnegie Mellon Univ., 1986.

[1988] S. Biyabani, J. Stankovic, and K. Ramamritham. The Integration of Deadline and Criticalness in Hard Real-Time Scheduling. Proc. Ninth Real-Time Systems Symp., Dec. 1988.

[1991] S. Baruah, G. Koren, B. Mishra, A. Raghunathan, L. Rosier, and D. Shasha. On-Line Scheduling in the Presence of Overload. Proc. 32nd Ann. IEEE Symp. Foundations of Computer Science, San Juan, Puerto Rico, Oct. 1991.

[1992] G. Koren and D. Shasha. Dover: An Optimal On-Line Scheduling Algorithm for Overloaded Real-Time Systems. Proc. 13th Real-Time Systems Symp., Phoenix, Ariz., Dec. 1992.

gestion des surcharges dans des applications temps réel régies par un ordonnancement à échéance et avec importance (thèse de Joëlle Delacroix dirigée par Claude Kaiser au laboratoire CEDRIC du CNAM de 1991 à 1994, et divers travaux qui l'ont suivie).

Notons aussi que l'ordonnancement préemptif suppose une architecture matérielle plus étoffée que celle du TRW 133, avec mode maître, protection mémoire, instructions réentrantes.

Le CCC est relativement isolé dans le contexte mondial où les leaders du développement informatique sont les Américains et les Anglais. Nous n'avions pas de contacts scientifiques avec eux. Nous étions à l'écoute, mais nous apprenions les nouveautés par les documents publiés dans les revues, donc avec un certain retard par rapport à leur apparition.

Bilan par les utilisateurs

- Le PVA, dont la commande échantillonnée pilotée par un CAE 133 a été réalisée au Centre de Calcul Coelacanthé, a fonctionné sur le Gymnote et le Redoutable. Il est alors installé aussi sur toute la génération des SNLE/M20. Il y aura donc au total 6 PVA de cette génération qui seront opérationnels jusqu'à la refonte terminée en 1985.

En 2010, l'Amiral Jacques Bisson a bien résumé l'enjeu de ce projet : *« Cette première tentative d'utilisation à grande échelle de l'informatique à bord des sous-marins n'a pas donné de résultats opérationnels très positifs, mais elle n'est pas responsable du fait que concernant la Situation Tactique la détermination de distance était quasiment impossible et que concernant le Recalage le sous-marin opérait dans une zone où les étoiles étaient rarement visibles... Mais l'expérience méritait d'être tentée et je ne regrette pas d'y avoir participé. »*

D'autres commandants ont eu plus de chances avec le ciel et ont pu effectuer des relevés astraux de nuit. Faire le point avec le PVA était une occupation qui intéressait les sous-mariniéristes⁹².

La refonte et les SNLE/M4

De 1978 à 1981, de nombreuses réunions de travail entre le STCAN, l'État Major de la Marine, le LRBA/VERNON et les théoriciens de la SAGEM (Pierre Faurre⁹³, Jacques Barriac), permettent de jeter les bases du Système Global de

⁹² Dans <http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=112443>, un article Mer et Marine du 15/02/2010 rappelle l'histoire du Redoutable L'amiral Bernard Louzeau, alors capitaine de Frégate commandant l'équipage bleu, raconte : « Début 1972, le Redoutable est paré pour sa première patrouille opérationnelle. Pendant plus de deux mois, les journées seront rythmées par les opérations de recalage, menées alternativement avec le système américain Transit et le périscope de visée astrale. »

⁹³ Pierre Faurre, X 1960, major de la promotion, Ingénieur des Mines, Ph.D. à l'université Stanford avec le professeur Rudolf Kalman. Il est professeur à l'École des Mines. Il sera Président de la Sagem, Président du conseil

Navigation et de lancer son développement pour aboutir à une installation sur L'INFLEXIBLE en 1985 (premier SNLE/M4).

La refonte M4 profite bien sûr de l'évolution fantastique, en quinze ans, de la technologie des matériels informatiques, accompagnée aussi par une évolution comparable des langages « temps réel », par l'apparition de nouvelles techniques de filtrage et par une nouvelle façon de développer les logiciels destinés aux applications militaires. Le Système Global de Navigation et ses composantes profitent de toutes ces évolutions.

Les calculateurs, c'est-à-dire les « vieux » CAE 133, sont remplacés par la version militarisée du MITRA 125 (125 M) développée par la CII. Le Mitra 125 est un mini-ordinateur de 16 bits avec un accès mémoire de 350 ns ; il effectue une addition en 2,3 microsecondes, il comprend 256 registres, une mémoire de 512 Kbits de 16 bits, il peut avoir trois processeurs d'E/S, ayant chacun un débit d'E/S de 2,2 Mbps. Un moniteur temps réel est fourni par la CII.

Ce moniteur temps réel gère des tâches temps réel, par priorités fixes et avec préemption du processeur par une tâche nouvelle de priorité supérieure à la tâche en cours. Il n'y a pas de gestion par priorités dynamiques ou par échéances. On n'en a plus besoin car le processeur est assez puissant, le traitement des interruptions est assez rapide et la préemption de tâches assure des temps de réponse suffisants pour les tâches critiques de l'application. Toutes les tâches partagent une mémoire unique (pas de mémoire virtuelle). Le noyau du moniteur n'est pas réentrant.

L'évolution marquante du PVA comme moyen de recalage des Centrales Inertielles de Navigation (CIN) est la suppression de l'opérateur humain dans la boucle de pointage des étoiles, ce qui conduit à développer un nouvel équipement, appelé Moyen de Recalage Astral (MRA), entièrement automatisé, réalisé complètement par la SAGEM qui, entre temps, a racheté les activités optiques (au moins) de la SOPELEM. Ce MRA intégré dans le Système Global de Navigation détermine la meilleure estimation de navigation par filtrage de Kalman des informations élaborées par la CIN, la radio-navigation, le loch (et ultérieurement le GPS).

Quand vers 1975 est prise la décision de refondre les logiciels tactiques, les études et le développement sont confiés à une société extérieure. La société SYSECA emporte le marché et met en place à Brest une équipe solide qui apporte l'expérience du SENIT auquel certains de ses membres avaient participé.

Bilan humain

L'aspect formateur et l'acquisition d'expertise pour les acteurs sont bien soulignés par Philippe Denoyelle, de la CAE.

« Au printemps 1964, un jeune ingénieur terminait son service dans la marine. Trois

d'administration de l'École polytechnique, membre de l'Académie des sciences en 1985.

candidatures spontanées, trois offres d'embauche... Il faut dire que les ingénieurs ayant étudié les structures des ordinateurs, les transistors et la programmation ne couraient pas les rues ! [Denoyelle] »

L'expérience acquise au Centre de Calcul Coelacanthé, et plus particulièrement la culture pratique sur le temps réel, valorisaient encore davantage la formation scientifique reçue en écoles d'ingénieurs.

Une majorité des acteurs choisit de continuer une activité d'ingénieurs en informatique, et plutôt dans le domaine de l'informatique scientifique, du temps réel ou des systèmes, que ce soit chez des constructeurs ou dans des sociétés de service.

Michel Ritout entre à la SEMA, puis à la STERIA.

Denis Derville continue sa carrière à la CAE, puis à la CII.

Claude Ducarouge, Daniel Poirson, Alain Sauvestre rejoignent l'équipe BULL dans l'aventure de la création du L64-GCOS7, un OS qui est toujours opérationnel en 2010. Tous les trois y feront la plus grande partie de leur vie professionnelle.

Georges Imbert va au laboratoire de recherche de la Télémécanique Électrique.

Pierre Tellier, engagé par Aéroports de Paris, prend des responsabilités dans la gestion informatique temps réel des aéroports. Il y est rejoint, pour un temps, par Jean-Loup du Chéné et par Jean Le Bihan.

Suite à une candidature spontanée, Gérard Le Lann est embauché par le CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire, Genève). Il y « découvre » les réseaux locaux (suivi du faisceau de particules par plusieurs PDP-11 reliés à un CII 10070), participe au développement des protocoles de communication ainsi qu'à la réalisation du système d'exploitation temps réel pour le CII 10070 (fabriqué par CII sous licence Xerox Data Systems) destiné à remplacer SIRIS7.

D'autres rejoignent l'EDF, comme Pierre Bourdon et Joseph Kandel.

Certains sont attirés par une recherche plus fondamentale. La création de l'IRIA et la présence de Henri Boucher comme conseiller scientifique du professeur Michel Laudet, premier directeur de l'IRIA, donne à ces ingénieurs sans thèse universitaire la possibilité de valoriser leur compétence en systèmes informatiques. On y retrouve Pierre Boullier (équipe CPL/1), Jean Ferrié et Claude Kaiser (équipe Ésope), Alain Lemaire (responsable de l'équipe Métavisu), puis un peu plus tard Gérard Le Lann (projet-pilote Cyclades), Jean Le Bihan (projet-pilote Cyclades, puis responsable du projet-pilote Sirius).

Jean-Noël Contensou rejoint aussi l'IRIA, comme secrétaire du CRI (comité de recherche en informatique), avant de se spécialiser en CAO (conception assistée par ordinateur).

Christian Imbert et Mireille Bourbotte continuent à travailler pour la DCAN ou la DGA sur des logiciels embarqués, en étant employé par des sociétés de service.

Le commandant Jacques Bisson devient pacha du premier équipage rouge du

SNLE Le Redoutable, et par la suite reçoit de grandes responsabilités de commandement ou d'état-Major pour les Forces Sous-Marines.

Les IDT Guy Bizien et Alain Luciano font de brillantes carrières techniques à la DCN, fortement influencées par ce début au CCC.

L'IGM Michel de Guillebon reçoit diverses affectations administratives à la DCN avant d'être détaché au Ministère des Affaires étrangères et dans l'industrie.

Yves Peirottes quitte la DMA, passe dans l'industrie pour une carrière de direction de sociétés.

Bibliographie

[Hill 1961] Richard H. Hill. Stored Logic Revisited. Information Systems Department Thomson Ramo Wooldridge Inc. RW Division. 20 pages, 1961.

(disponible à http://bitsavers.org/pdf/trw/trw-130/Hill_Stored_Logic_Revisited_Dec61.pdf)

[McGee 1964] McGee W. C. The TRW 133 Computer, Datamation 10 (2) pp. 27-29, 1964.

[Kaiser 1967] Kaiser Claude. Informatica. Journée d'information du 23.02.1967

[Derville 1967] Denis Derville, Claude Kaiser, Yves Peirottes, Pierre Tellier. Le système Haliotis, RIRO 1,6, pp. 3-25, 1967.

[Contensou 1968] Jean-Noël Contensou, Yves Picot. Systèmes : sûreté de fonctionnement et sécurité RIRO 2,1, pp.3-48, 1968.

[Gasztowtt 1969] Benoit Gasztowtt. Application des calculateurs numériques à la conduite des armes navales. Revue Automatismes, tome XIV n°9 septembre 1969. pp. 454-461. <on y parle du SENIT et du Masurca>

Un site internet associé à cette chronique

<http://cedric.cnam.fr/~claudio/HALLOTIS/>

Quelques autres liens sur internet

Documents concernant le TRW 130 et 133 : <http://bitsavers.org/pdf/trw>

Documentation sur l'Inductosyn : <http://www.cti.fr/inductosyn.html> et <http://www.inductosyn.com>

[Denoyelle] Philippe Denoyelle – ACONIT Du CAE 130 à IRIS 65M : Six ans de la division militaire de CAE-CII voir http://www.aconit.org/histoire/du_cae130_a_iris65m/index.php

Le sous-marin Le Redoutable

Site Sousmarins.fr fm : <http://codingrulz.free.fr/fichiers/electronique.htm>

<Avant l'ère des sous-marins de nouvelles générations, les sous-mariniens utilisaient un PVA (Périscopes de Visée Astrale), on pouvait ainsi déterminer sa position grâce aux placements des étoiles>

Photo du PVA à Cherbourg

<http://www.netmarine.net/bat/smarins/redoutab/index.htm>

<http://www.netmarine.net/bat/smarins/redoutab/photos.htm>

<http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=112443>

Le 15/02/2010 la Newsletter « Mer et Marine » rappelle l'histoire du Redoutable

« Le problème du positionnement en plongée est loin d'être simple, mais ce pari difficile a été réglé avec les centrales inertielles », souligne Pierre Quinchon, directeur du pôle Navires et Systèmes à DCN. Afin de se positionner, les SNLE français pouvaient utiliser le système américain Transit. Toutefois, « nous avons une confiance limitée dans les américains », note un ancien officier du Redoutable. Afin de garantir leur indépendance, les Français mettent donc au point un périscope de visée astrale, équipement particulièrement complexe dont le réglage sera un véritable tour de force. Ce mât de deux tonnes, reposant sur une boule, permet de recalibrer les centrales inertielles ».

Grands systèmes militaires US de l'époque

Système SAGE de surveillance aérienne aux US :

<http://www.radomes.org/museum/>

<http://www.computermuseum.li/Testpage/IBM-SAGE-computer.htm>

Naval Tactical Data System (NTDS) de la marine US :

http://en.wikipedia.org/wiki/Naval_Tactical_Data_System

<http://ed-thelen.org/comp-hist/univac-ntds.html>

TRW 130 AN/UYK-1 :

<http://ed-thelen.org/comp-hist/BRL64-t.html> - [TRW-230-130-AN/UYK-1](http://ed-thelen.org/comp-hist/TRW-230-130-AN/UYK-1.html)

En guise de conclusion

« Mais Socrate a dit: quand tu dis que tu crois, ne crois pas que tu sais, tu sais seulement que tu crois. »

Cette chronique s'est appuyée sur les souvenirs des acteurs et sur les rares documents qu'ils ont conservés. Jacques Bisson, Guy Bizien, Claude Ducarouge, Christian Imbert, Georges Imbert, Gérard Le Lann, Alain Luciano, Daniel Poirson et Pierre Tellier sont ceux qui m'ont fourni le plus d'éléments pour ce texte. Nos souvenirs sont lointains, parfois confus, parfois contradictoires. Il est difficile de ne pas se laisser influencer par les souvenirs de nos activités postérieures, surtout si elles sont restées dans le même domaine. Il est difficile de ne pas survaloriser le rôle de ceux qui ont la mémoire la plus vivace ou le plus de documentation. Nous ne sommes pas des historiens. Il appartiendra à ceux-ci de compléter nos dires, de les corriger si nécessaire, en consultant les archives du STCAN, ce que nous n'avons pas voulu faire. Notre but est de montrer la vie d'une petite communauté de formation scientifique, dans notre coin du 15^e arrondissement de Paris, qui a vécu une expérience passionnante, dans un contexte favorable, avec des moyens importants, sans avoir à se préoccuper de leur financement⁹⁴. Cette expérience a été voulue, encouragée et protégée par l'ICGM Henri Boucher qui s'occupait de toutes les dépenses. Financés par la politique de la force de dissuasion, nous étions

⁹⁴ Aujourd'hui, même pour des chercheurs en informatique, c'est inimaginable.

quand même en marge de la grande histoire, dans notre petit village parisien. Nous étions de jeunes ingénieurs passionnés par l'informatique, avant toute autre considération. Cela s'est vu aussi en mai 1968, qui n'a pas fait débat au Centre de Calcul Coelacanthé.

Plus ou moins consciemment, nous avons écrit une chronique pour nos enfants et petits-enfants et pour montrer aux générations futures le plaisir qu'un grand projet peut procurer à des ingénieurs de formation scientifique!

Quelques anecdotes

L'arrivée de Pierre Tellier à la CAE en 1965

Je suis embauché à la CAE, aux Clayes-sous-bois, le 1^{er} avril 1965.

Du 1^{er} avril 1965 à mi 1966, initiation puis approfondissement de la programmation du calculateur TRW 133 francisé sous le nom de CAE 133.

- Sous la responsabilité hiérarchique de Pierre Guichet, je me vois confier la réalisation d'un moniteur temps réel pour le CAE 133 après le dialogue surréaliste suivant :

P.G. : Vous connaissez quelque chose au temps réel ?

P.T. : Non

P.G. : Tant mieux, vous n'aurez pas d'idées préconçues.

- Après des contacts pris entre M. Boucher et M. Ferront (mon supérieur direct), rendez-vous, à l'université de Toulouse, avec un chercheur qui m'a exposé, en une matinée, les principes d'un moniteur sur lequel il travaillait;
- Les principes de ce moniteur ont été alors adoptés et complétés (priorités, ...) au CAE 133 par moi-même.

Après la réception du moniteur du CAE 133 par la Marine Nationale, je suis mis à disposition du Centre Coelacanthé à partir de la mi 1966 et jusqu'au 30 septembre 1969.

La méthode Chaix de vérification des programmes

La notion de vérification existait au STCAN/CA et était couramment pratiquée pour la commande analogique ou à relais, sous la direction de l'ICGM Chaix. Celui-ci a voulu essayer d'utiliser la même méthode pour les programmes de l'asservissement du PVA. Ainsi, en 1963, un programme simple de contrôle digital écrit par Claude Kaiser a été entièrement transcodé (en 2010, on dira « mappé ») à la main en un schéma de logique séquentielle à relais. Ce schéma a été dessiné et mis à plat dans la « salle des planches à dessins », immense hall avec un plancher en bois sur lequel étaient dessinés les plans des carènes. Son

fonctionnement devait être vérifié en analysant ce dessin. Cette démarche de vérification n'a pas pu être menée à bout car le schéma de logique séquentielle traduisant ce programme simple atteignait les limites de la vérification humaine et, pire, il ne pouvait pas être dessiné d'un seul tenant dans la salle des dessins. Mais l'idée de mapper un programme dans un modèle à la sémantique bien connue afin de pouvoir l'analyser dans sa version mappée est déjà présente. C'est déjà l'embryon de l'idée du « model checking »

L'arrivée d'Alain Luciano au Centre de Calcul en 1965

Envoyé en mission de longue durée à Paris, par mon Sous-directeur toulonnais (et contre mon gré un mois après mon affectation à Toulon à la sortie de l'école), je débarquai à Balard par un matin blême et froid, le 2 Janvier 1965, dans le bureau de l'ICGM BOUCHER où le dialogue surréaliste suivant s'est engagé, après les salutations d'usage :

HB : Avez-vous fait de l'analyse et du calcul numérique ?

AL : Non Monsieur,

HB : Avez-vous entendu parler de calculateurs digitaux ?

AL : Non Monsieur,

HB : Alors, vous êtes au moins électronicien ?

AL : Non Monsieur,

HB (dépité) : Mais alors, que venez vous faire ici ?

AL : Ben...euh...On m'a dit que c'était pour constituer une équipe de techniciens qui devrait effectuer des essais d'un équipement du futur SNLE à Toulon sur le SM Gymnote.

HB : Bon, je vois ! Je vous donne le cours de Machines informatiques que j'enseigne à l'ENSGM. Vous le lisez, vous l'apprenez, vous en faites un condensé et vous reviendrez me voir après. Au revoir !

AL : Bien Monsieur (j'ai eu envie de lui dire Adieu !).

Heureusement que Claude Kaiser était là pour me soutenir et atténuer un peu mon angoisse !

Dans la foulée, visite au 16, de la rue Emeriau à l'Atelier Central d'Électronique pour rencontrer les ingénieurs avec lesquels j'allais devoir travailler, à commencer par le soldat de 2^{ème} classe Derville, encastré dans un bureau d'au moins 3 m², au milieu d'un épais nuage de fumée de cigarettes dans lequel j'ai cru distinguer les EOR Christian Imbert, Georges Imbert, Pierre Bourdon et Joseph Kandel.

Pour finir de me plomber le moral, Claude Kaiser me conduisit dans un hangar poussiéreux, au fond de la cour de l'A.C.E., destiné à héberger le futur Centre de

Calcul Coelacanthé !

Il m'orienta, fièrement, vers une cage vitrée qui allait devenir mon bureau, avec vue imprenable sur les tourets de câbles électriques, un pont roulant, une table oscillante, plus divers objets non identifiés disposés dans un certain désordre.

Cette journée fut pour moi un grand moment de solitude !

La pesée du sous-marin, souvenir de Daniel Poirson

Parmi tous les programmes que nous développions pour le Système Logiciel du « Redoutable », il y en avait quelques-uns qui étaient destinés à faciliter la navigation du bâtiment, dont celui-ci qui s'appelait « la pesée du sous-marin ».

Il s'agissait de mesurer et de contrôler les quantités d'eau qui étaient admises dans les caisses de réglage pour assurer soit le maintien de l'assiette du sous-marin, soit pour le faire plonger ou remonter suivant les besoins. En tous les cas pour le maintenir dans un bon équilibre.

Si mes souvenirs sont exacts (Daniel Poirson dixit), c'était peut-être Alain Sauvestre (un « supélec » comme moi) qui développait cette application.

Nous voyions très souvent le Commandant Jacques Bisson qui venait derrière lui sur la machine, et qui lui demandait régulièrement :

« Vous prévoyez bien une possibilité de passage en mode manuel, n'est-ce pas ? »

Loin de moi l'idée de me moquer de cette préoccupation permanente, qui nous faisait néanmoins sourire à l'époque. Quand on voit l'énorme quantité d'erreurs (de « bugs » comme on dit), que l'on est capable d'introduire dans les logiciels – croyez-en mon expérience de près de 35 ans dans le développement des Systèmes d'Exploitation des ordinateurs, et ce ne sont pas les utilisateurs de Windows qui me contrediront –, on admettra que c'était lui l'homme d'expérience et de terrain (si on peut employer ce terme pour le milieu aquatique ?) qui avait raison.

Il savait que si on est capable de reprendre le contrôle sur les divers dispositifs automatisés, aussi sophistiqués soient-ils – et peut-être surtout s'ils le sont -, on a une certaine chance de redresser la situation, et en l'occurrence de sauver des hommes, quand on a derrière soi un certain nombre d'heures de pratique !

J'ai retenu cette leçon par la suite dans mon activité professionnelle.

Quand un programme ne marche pas, ce ne peut être à cause du « hard »

G. Le Lann

Lorsque furent fixées de manière définitive les adresses d'emplacements en mémoire principale des programmes résidants et de la zone « overlay », le calculateur cessa de fonctionner correctement lorsque l'on activait le programme (noté ici PC) de chargement des codes non résidants en zone « overlay ». Soit F l'adresse qui fut choisie comme adresse de fin de la zone « overlay ». F différerait

de l'adresse de fin utilisée lorsque je mettais PC au point.

Phénomène étrange, le calculateur partait en boucle infinie. Le 133 ignorait même l'adresse d'arrêt que l'on pouvait afficher aux clés en façade du 133, et ce quelle que soit l'adresse d'arrêt affichée. Pour arrêter le 133, il fallait en couper l'alimentation électrique !

Denis Derville, qui suivait mes « malheurs » – j'étais installé dans son bureau – se moquait gentiment. Et lorsque j'osais finalement lui dire que je suspectais le « hard », mais sans pouvoir fournir d'explication, il s'esclaffa franchement dans son style inimitable qui le rendait si sympathique (« mais oui bien sûr, c'est ce que disent tous les débutants », suivi d'un allumage de cigarette).

Après moult tentatives infructueuses de « correction » du programme PC (qui avait fonctionné correctement pendant des mois auparavant), j'eus l'idée de prendre F-1 comme adresse de fin de la zone « overlay ». Tout fonctionnait correctement à nouveau. Idem avec F+1.

Il fallait bien cela pour convaincre Denis. Ensemble devant le 133, il put constater le phénomène. Il ne pouvait plus y avoir de doute : le TRW 133 souffrait d'une erreur de conception de sa logique d'adressage. Il partait en boucle infinie lorsque l'on exécutait une instruction de type « move/write memory buffer » avec pour F l'adresse de fin des 32 K mots de mémoire principale. Il se trouvait que c'était justement cette adresse qui avait été choisie au moment du « gel » définitif des emplacements mémoire principale ! Résultat : cette adresse n'a jamais pu être utilisée dans les CAE 133 Haliotis.

Contacté, TRW nous répondit un ou deux mois plus tard en nous disant que cette faille était connue (et en joignant une fiche de type « correctif », qui était hélas absente de la documentation fournie initialement) !

Pot de départ de Claude Kaiser en mars 1968

Claude Kaiser avait fait visiter la salle de calcul à un jeune peintre qui fut émerveillé par la figuration abstraite du câblage des machines vu de l'arrière des armoires, et ce peintre avait prêté quelques tableaux qui étaient accrochés dans les couloirs du CCC. À l'École des Beaux-Arts, c'était la mode de l'expressionnisme abstrait et de l'« action painting » lancée par l'américain Jackson Pollock qui prônait la spontanéité et la gestuelle dans la création picturale. On avait passé quelques bons moments de franche gaieté à chercher avec les techniciens dans quel sens il convenait d'accrocher ces tableaux non-figuratifs. Au pot de départ de Claude Kaiser, après quelques libations, ce peintre nous a fait créer une œuvre collective, chacun de nous mettant sur la toile, à tour de rôle, sa marque par un geste spontané avec un pinceau plein de peinture.

La première étoile du Gymnote en juillet 1968 (Alain Luciano)

De nombreuses tribulations marquent, de la mi-67 à la mi-68, les mises au point laborieuses du PVA, du Système de transfert d'Azimut et de la CIN à bord du bâtiment. Nous nous retrouvons un soir de juillet 1968 à disposer enfin d'un ciel parfaitement dégagé, le Gymnote à quai et tous les matériels et logiciels de la chaîne PVA====>STA====>CIN fonctionnant en même temps, plus de quelques minutes !...

Bref, des conditions idéales !

Et là, pour la première fois, l'opérateur du PVA (dont je n'ai malheureusement pas retenu le nom) voit passer d'un seul coup dans son oculaire un petit point lumineux qui traverse à toute allure le champ du PVA. Après s'être exclamé, il ramène l'étoile à peu près au centre avec son senseur à boule avant de valider la position de l'astre (c'était IVIS 31 dans le catalogue des astres !), afin de déterminer la première droite de hauteur. Ouf !

Je n'ai pas retenu l'écart entre le point calculé et la position réelle du SM, mais enfin on avait validé le concept de Système de Recalage Astral.

Le reste de la nuit fut « chaud », car chacun voulait voir son étoile défilier dans le champ du PVA et éprouver une certaine émotion quand le PVA se calait automatiquement sur elle...

Après avoir rendu compte de l'évènement à CA/SM le lendemain matin, nous eûmes la surprise de voir débarquer, le soir même, l'ICGM PASQUIER en grand uniforme bleu marine d'hiver par une température avoisinant les 30 degrés ! Pas de pot ce soir-là, le ciel était assez couvert et quelques pannes sur le PVA nous interdirent de viser la moindre étoile !

C'était un coup à se faire briser la carrière !

Daniel Poirson chez les opérationnels

Je suis allé une fois à Balard, pour présenter à un parterre impressionnant de gradés, les aspects fonctionnels du Système. Pour la petite histoire, je n'ai pas été autorisé à rester écouter ce qui allait se dire dans la salle car je n'avais pas le niveau suffisant « d'habilitation au secret » : cela a été problématique car c'était moi qui allais parler ! Je ne sais pas ce qu'ils ont fait ensemble après que je sois parti ? Peut-être jouer aux cartes puisqu'ils ne pouvaient plus écouter ce que j'aurais dû leur expliquer ?

Je suis allé une autre fois à Taverny, au 5ème sous-sol (du centre opérationnel de contrôle des Forces Nucléaires Stratégiques de l'époque, si je me souviens bien ?). Cette fois-là j'avais le bon niveau d'habilitation, et j'expliquai à des officiers un peu perplexes comment il allait falloir coder, sur rubans perforés, pour l'enregistrement ultérieur sur disque, les dossiers d'objectifs. Ils m'avaient expliqué que c'était secret (évidemment) et qu'il n'était pas question de faire

exécuter cette opération par des perfos-vérifs lambda. Ils se voyaient donc déjà en train de faire eux-mêmes cette saisie, ce qui ne les enchantait pas vraiment !

1969-1970 : DCAN Cherbourg – Section Études/Essais. Guy Bizien

Arrivé à la fin de la construction du Redoutable pour la mise au point et les essais en bassin du système de recalage astral, il ne fut pas facile de se faire une place dans les plannings! Je me souviens d'avoir demandé, en réunion de chantier, « de l'eau, du gaz et de l'électricité » pour faire un essai du PVA en rotation. Réponse du Chef de Chantier « Bizien, tu nous fais ch... avec ton PVA, on l'a déjà hissé une fois, il marche! ». Il faut dire que la fin de chantier était dantesque au Homet, des centaines de travailleurs se marchant les uns sur les autres, câbleurs, soudeurs, calorifugeurs, peintres, techniciens...

Heureusement, la nuit c'était un peu plus calme et on a pu valider les logiciels et les matériels selon le programme prévu. Pour viser des étoiles, il fallait aussi un ciel dégagé, et ce n'est pas courant à Cherbourg! Toute l'équipe PVA restait en alerte et si, la nuit tombée, je voyais des étoiles, je leur téléphonais et tous étaient à bord dans l'heure qui suivait!

Chaque avancée pouvait réserver des surprises, comme par exemple la tête de visée définitive remplaçant au dernier moment la provisoire. Le connecteur était câblé à l'envers, plus le temps de démonter, il fallut en plein hiver monter une cabane, et emmailloter le fer afin qu'il arrive à chauffer suffisamment pour réaliser les soudures.

Une anecdote sur mai 68, par Daniel Poirson

Pour continuer : une anecdote. Elle n'est pas technique, mais est bien représentative de l'ambiance de l'époque.

C'était en 1968 (en mai 68 exactement) et je devais tout juste commencer mon service avec engagement de 2 ans dans la Marine pour faire les EOR.

En cette période de forte perturbation sociale, il n'était évidemment pas question, pour nous qui étions militaires, de ne pas venir au bureau quelles que soient les difficultés de transport auxquelles nous nous trouvions confrontés. C'est ainsi que nous arrivions rue Émeriau, en milieu de matinée, en utilisant la plupart du temps les transports de substitution de l'époque, à savoir les camions militaires. Et nous repartions relativement tôt pour arriver à la maison dans des horaires acceptables.

Cependant, l'un de nous - nous l'appellerons Charles - avait trouvé un moyen astucieux de ne pas venir, et même d'aller passer quelques jours chez lui en Normandie : il avait laissé bien en évidence dans son bureau, son paquet de cigarettes sur la table et sa veste accrochée au porte-manteau.

Et comme le chef passait quelquefois pour lui poser une ou deux questions techniques, il nous demandait :

- il est là Charles?

Et nous lui répondions :

- oh, il ne doit pas être loin! On a vu ses cigarettes et sa veste dans le bureau.

Je crois que ce petit jeu a duré une bonne semaine, et que Charles est réapparu après quelques jours comme si de rien n'était.

Le chef n'y avait rien vu. Ou peut-être avait-il fait semblant, en n'étant pas dupe?

Annexes

1. Principales abréviations utilisées

AFIRO : Association Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle
AFCET : Association Française pour la Cybernétique Économique et Technique
CAE : Compagnie Européenne d'Automatisme Électronique
CII : Compagnie Internationale d'Informatique
CNAM : Conservatoire National des Arts et Métiers
CPM : Centre de Programmation de la Marine
DCAN : Direction des Constructions et Armes Navales
DLA : Direction de Lancement des Armes tactiques
DSM : Détection Sous Marine
ECAM-Lyon : École Catholique des Arts et Métiers
ENSAM : École Nationale Supérieure des Arts et Métiers
ENSEEIH : École Nationale Supérieure d'Électrotechnique d'Électronique d'Informatique
d'Hydraulique et des Télécommunications
ENSGM : École Nationale Supérieure du Génie Maritime
ENSIMAG : École Nationale Supérieure d'Informatique et Mathématiques Appliquées de
Grenoble
EOR : Élève Officier de Réserve
ESE : École Supérieure d'Électricité
ETSM/Brest : École Technique Supérieure de la Marine
GPS : Global Positioning System
IBM : International Business Machines Corporation
ICGM, IGGM : Ingénieur en chef du Génie Maritime, Ingénieur Général du Génie Maritime
IDT : Ingénieur de Direction de Travaux
IHM : Interface Homme Machine
IGM, IPGM : Ingénieur du Génie Maritime, Ingénieur Principal du Génie Maritime
INPG : Institut National Polytechnique de Grenoble
INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (ex IRIA)
IRIA : Institut de Recherche en Informatique et Automatique (devenu INRIA)
ISEN Lille : Institut Supérieur d'Électronique du Nord
LORAN : Long Range Navigation
MOP Coelacanth : Maître d'Ouvrage du Programme Coelacanth
MSBS : missiles Mer Sol Balistiques Stratégiques
NASA : National Aeronautics and Space Administration
PVA : Périscope de Visée Astrale
RIRO : Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle
SAGEM : Société d'Applications Générales Électriques et Mécaniques
SARST : Société Auxiliaire de la Recherche Scientifique et Technique
SEMA : Société d'Économie et de Mathématiques Appliquées
SENIT : Système d'Exploitation Navale des Informations Tactiques
SEREB : Société pour l'Étude et la Réalisation d'Engins Balistiques
SESA : Société d'Étude des Systèmes d'Automation
SINTRA : Société Industrielle des Nouvelles Techniques Radioélectriques
SNLE : Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins
STCAN : Service Technique des Constructions et Armes Navales
STCAN/CA : Groupe Conduite des armes au STCAN
TRW : Thomson Ramo Wooldridge
UNIVAC : UNIVERSAL Automatic Computer
X : École Polytechnique

2. Photos du PVA

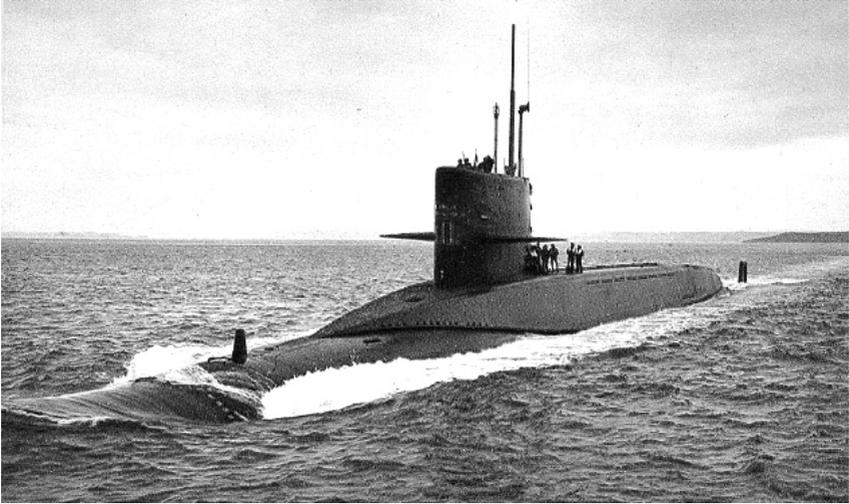


PVA : <http://www.discount-marine.com/club/content/visite-dun-navire-pas-comme-les-autres>



Périscopes

photo de <http://codingrulz.free.fr/fichiers/electronique.htm>



1974 - Le Redoutable en rade de Brest : agasm-sectionmine_rve.com/an_ecd3.htm



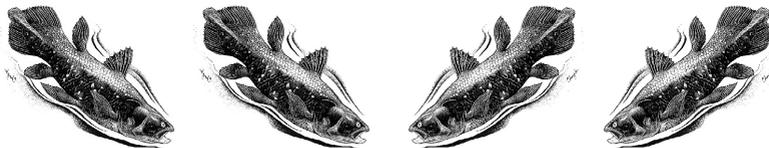
Le Redoutable en mer

leclubclio.free.fr/sous-marins/photos/visites/le_redoutable/p_le_redoutable.htm



aériens :

http://leclubclio.free.fr/sous-marins/photos/visites/le_redoutable/0_vues_exterieur.htm



Coelacantes (*Latimeria chalumnae*) et *Haliotis Lamellosa*

3. Photos du Pupitre de visualisation de la situation tactique



Photo de la [Cité de la Mer](http://www.netmarine.net/bat/smarins/redoutab/photos.htm) de Cherbourg (mai 2002).
<http://www.netmarine.net/bat/smarins/redoutab/photos.htm>



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIC_Le_Redoutable.JPG 6 July 2009 photo Duch.seb

4. Photos des CAE 133 et CAE 174 dans leurs armoires Marine

Photos prises par Jacques Bisson en octobre 2010 sur le Redoutable
exposé au Musée de la Mer à Cherbourg



Les 8 armoires Marine (armoires Chaix) contenant les CAE133 et CAE 174.

LE CENTRE DE CALCUL COELACANTHE (1963-1970)



La VHH, les unités de disques et la CAE 141 dans leurs armoires Marine

5. Que sont les hôtes du CCC devenus ?

Jacques Bisson a été le commandant du premier équipage rouge du Redoutable (1969-1973). Puis il a occupé plusieurs fonctions opérationnelles ou de commandement (centre SOUMENT, centre d'expérimentation du Pacifique, Force Océanique Stratégique, Sous-marins d'attaque, inspection des armements nucléaires). En 1987, il quitte le service actif avec le grade de vice-amiral d'escadre, et devient conseiller du président de COMURHEX (société nucléaire du groupe Péchiney puis Cogema). Il a été aussi administrateur de l'association « Enfants d'Asie ».

Guy Bizien a participé en 1970 aux essais du Redoutable à Cherbourg et à Brest. Ensuite au Centre SOUMENT il est affecté aux refontes et améliorations des logiciels tactiques des SNLE, puis à l'extension M4 du centre d'entraînement. En 1984 il est muté à DCN/Paris Bureau Plans/Budgets puis en 1990 à Brest Bureau d'Études Armes-Équipements.

Retraite en 1996.

Pierre Boullier rejoint l'INRIA (alors l'IRIA) comme ingénieur de recherche en avril 1970. En janvier 1984 il passe une thèse d'État en informatique. Ses principaux centres d'intérêts de recherche tournent autour de l'analyse syntaxique, des langages de programmation puis des langues naturelles (système SYNTAX). Il est le concepteur des « grammaires à concaténation d'intervalles » (Range concatenation Grammars).

À sa retraite en avril 2009 il est nommé directeur de recherche émérite de l'INRIA.

Mireille Bourbotte est mutée au CPM en 1970 et fait toute sa carrière comme ingénieur civil à la DGA : 1988 chef de projet Senit6 (Cassard et Jean Bart), 1992 chef de projet du programme Horizon coopération FR, UK, Italie, 2001 Directrice du programme des Systèmes d'Information de la Marine (SIC21).

Retraite depuis avril 2004.

Pierre Bourdon fait toute sa carrière professionnelle chez Électricité de France. Dispatcheur à la sécurité des réseaux de transport électricité. Chef de division au Département Statistique. Chef de division Service Mouvement d'Énergie - Département Exploitation. Directeur de Dispatching à Toulouse. Auditeur Interne - Service Inspection.

Retraite en 2002.

Jean-Noël Contensou est d'octobre 1968 à mars 1970 à Cherbourg pour les essais des fonctions tactiques sur le Redoutable, à l'IRIA en Avril 1970 pour y devenir secrétaire du CRI (comité de recherche en informatique). Ensuite, dans des sociétés de service en informatique, il se spécialise en CAO, électronique en particulier. Enseignant à Toulouse, à SupAéro puis à l'ENSEEIH.

Retraite en 2002.

Denis Derville, qui était déjà à la division militaire de la CAE, devient chargé du logiciel du Mitra pour CII. Puis à la Direction logicielle de Claude Boulle, il reprend l'équipe SIRIS 3 (gamme IRIS 50/60), avec aussi la responsabilité du frontal (i.e. le DATANET de la CII) sur la base du Mitra 15/125. Il dirige l'étude de la Gamme Y. Après la fusion avec HB et l'arrêt du développement de SIRIS 3 et de l'étude de la gamme Y, il est responsable du développement du DATANET sur la base du Mini 6. Au début de l'année 80, il quitte CII-HB pour rejoindre THOMSON CSF/Téléphone à la demande de Pierre Guichet. Denis est décédé le 1^{er} avril 2000.

Claude Ducarouge : 1969 - 1996 : BULL. Participe à la création du L64-GCOS7, un OS toujours opérationnel en 2010. Contribue à des développements du logiciel, à la méthodologie, à l'intégration puis au product planning. Ensuite coordination firmware L64. Devient responsable des équipes systèmes et réseaux inter-établissements. Chef du département validation systèmes et réseaux. 1996 - 2002 : Consultant à la direction informatique de EDF et GDF pour les systèmes et réseaux.

Retraite en 2002. Expert près la Cour d'appel en informatique.

Jean-Loup du Chéné. De 1969 à 1973, il est à l'Aéroport de Paris (Système informatique CAPEX). De 1973 à 1976 à la CII, sous les ordres de Derville, développement du système d'exploitation pour une nouvelle gamme d'ordinateurs avec Unidata. De 1976 à 1984 : SITA/Paris. Chef de projet du nouveau réseau basé sur UNISYS DCP40. Puis 1984-2003 : SITA/Atlanta. Directeur R&D en charge de l'implémentation de nouvelles technologies.

2004 : Retraite. Est Secrétaire de l'Alliance Française dans le sud ouest de la Floride (USA).

Jean Ferrié rejoint l'équipe Ésope à l'INRIA (alors IRIA) comme ingénieur de recherche. Après avoir passé un doctorat d'État en Informatique, il devient en 1975 professeur des Universités à Montpellier (École d'ingénieurs Polytech'Montpellier, ex-ISIM) où il poursuit une carrière d'enseignant chercheur dans le cadre des laboratoires de recherche LSI et LIRMM.

En retraite depuis novembre 2009.

Didier Guérin évolue chez HEWLETT-PACKARD dans des postes commerciaux et techniques de 1970 à 1987 dans le domaine des systèmes informatiques. À partir de 1988, il devient consultant informatique pour les ERP («Enterprise Resource Planning»), en français Progiciel de gestion intégré) et les systèmes d'information.

Retraite en 2007. Activité de conseil en libéral à temps partiel.

Michel de Guillebon est nommé au STCAN en 1968 puis reçoit diverses affectations à la DCN : chef de cabinet du Directeur, sous-directeur administratif et financier à la DCAN Cherbourg, chef du bureau des Affaires Internationales. Occupe plusieurs postes au Ministère des Affaires étrangères et dans l'industrie.

1992: Admis dans la 2^{ème} Section des Ingénieurs Généraux de l'Armement.

Christian Imbert est Ingénieur à CIMSA, THOMSON-CSF puis OSYS (1992). Il travaille à Toulon sur les logiciels pour sous-marins et bâtiments de surface. Retraité au 1^{er} janvier 2004.

Georges Imbert : 1966-69 Ingénieur au Service Recherches de la Télémechanique Électrique (Conception réalisation d'un proto de calculateur industriel). 1969-71 Ingénieur Service Méthodes en électronique à Télémechanique Électrique. 1971-72 Ingénieur d'études à Sté Aérospatiale. 1973-2004 Professeur d'automatique industrielle à l'ENSAM Paris. Retraité en août 2004.

Claude Jamy : en 1968 retourne dans le secteur aérospatial où il avait participé au programme Diamant comme ingénieur à la division mathématiques du CNES en 1965-66, et entre à l'ONERA comme ingénieur au Centre de calcul. 1975 : Chef de groupe à la direction des moyens informatiques. 1983 : Adjoint informatique auprès du directeur de l'aérodynamique. 1992 : Directeur de la diversification, à la direction générale. Retraite de l'ONERA en 2001.

Claude Kaiser rejoint l'INRIA en 1969 (alors IRIA) comme ingénieur de recherche, participe à la conception et au développement du système Ésope de temps partagé, passe une thèse d'État en 1973 ; en 1974 devient enseignant chercheur, professeur au CNAM, titulaire de la chaire Informatique programmation, où il succède à François-Henri Raymond en 1982. Au CNAM, il crée le laboratoire de recherche Cédric et le département d'informatique. À sa retraite en 2006, il est nommé professeur émérite du CNAM.

Joseph Kandel fait carrière à EDF dans la Production d'électricité d'origine nucléaire. Après une spécialisation en Génie Atomique, il participe au démarrage des Centrales Nucléaires à Eau Pressurisée de Chooz A, Fessenheim 1-2, Paluel 3-4, Chooz B 1-2 et finit sa carrière sur le projet EPR (European Pressurized Water Reactor). Prend sa retraite en 1998 à 60 ans.

Jean Le Bihan : 1968 : Aéroports de Paris, responsable du service « Système » pour la conception et le développement de CAPEX, système temps réel pour la gestion opérationnelle des aéroports. 1972 : INRIA (alors IRIA), coordination du projet pilote CYCLADES (réseau à commutations de paquets). 1977 : Direction du projet pilote SIRIUS (bases de données réparties). 1981 : Agence de l'Informatique, responsable du service d'Aide à la Recherche en Informatique et Automatique. 1983 : Consultant indépendant, conseiller scientifique à l'INRIA (projet pilote Nadir). Après 1985 : PDG d'IFATEC (SSCI) qui, en 1994, sera intégrée au groupe COGEMA. Retraite en 1997. (Jean est décédé le 22 août 2010)

Gérard Le Lann : fin 1969, rejoint le projet Omega du CERN, Genève (réseau local pour suivi du faisceau de particules). Chercheur INRIA fin 1972 (projet-pilote Cyclades), puis visiting researcher à l'Université de Stanford (1973-74), où il contribue à la spécification du protocole TCP d'Internet. Passe une thèse d'État en 1977, est nommé directeur de recherche INRIA en 1978, responsable de projets de recherche et de transfert industriel (systèmes distribués ou/et embarqués, temps réel, réseaux locaux).

Retraité en 2008, tout en étant chargé de mission DGA et directeur de recherche émérite de l'INRIA.

Alain Lemaire : 1969 IRIA : responsable de la réalisation d'une extension graphique de Fortran 77. 1978 : ECMWF: responsable de la programmation d'une station de travail anglaise pour la météorologie. 1981 : DANECOM, responsable de la francisation d'une station de travail américaine. 1987 : FRANLAB : développeur de programmes graphiques pour l'industrie du pétrole. 1988 : EUREKA Systèmes : directeur technique d'une SSII spécialisée dans les développements graphiques.

Retraite en 2003.

Alain Luciano : 1969 : spécialisation dans les OS des gros ordinateurs. 1973 : entre dans le corps des IA ; au STCAN est chargé des Systèmes de navigation des SNLE/M1 et M4. 1981 : adjoint au MOP/COELACANTHE, dirige le programme de construction de L'INFLEXIBLE (1^{er} SNLE/M4), participe aux refontes M1/M4 et aux études des SNLE/NG. 1985 : met en place au SIAR l'évaluation de la qualité des logiciels d'Armement. 1989 : Sous-directeur Informatique et Moyens Industriels à la DCN/TOULON.

1993 : Admis dans la 2^{ème} Section des Ingénieurs Généraux de l'Armement.

Yves Peirotes : quitte le CCC en 1970 et passe dans l'industrie privée où il aura des responsabilités croissantes, d'abord chez STAFOR-FACOM, puis en 1981 dans le groupe SAINT GOBAIN et enfin en 1985 dans le groupe ELECTROLUX. Il terminera sa carrière comme Président Directeur Général d'ELECTROLUX FRANCE de 1985 à 2000.

Retraité depuis 2001. Associé-fondateur de plusieurs start-ups.

Daniel Poirson entre chez BULL en 1970 et y passe toute sa vie professionnelle. Il participe à la création du L64-GCOS7, un OS de mainframe toujours opérationnel en 2010. Plus de 30 années d'expérience en informatique (de la Marine ... à BULL) : ingénieur de développement, intégrateur système, responsable d'une équipe de développeurs puis du département bases de données de GCOS 7, responsable de l'activité « Planning et Marketing Produits GCOS 7.

Retraite en 2007.

Michel Ritout Michel RITOUT entre à la SEMA puis, en 1969, est l'un des fondateurs, aux côtés de Jean CARTERON, de la STERIA où il fera toute sa carrière.

Retraite fin 1999.

Jean-Pierre Saada entre comme chef de projet chez PECHINEY (gestion de production), devient responsable du service méthodologie et outils de développement informatiques. Est directeur informatique dans une banque privée puis directeur des systèmes d'information dans un organisme de retraite et de prévoyance.

Retraite en juillet 2005.

Pierre Tellier : Aéroports de Paris en octobre 1969 ; il y fait toute sa carrière. D'abord en informatique, comme responsable de la programmation temps réel sous la direction d'Yves Picot, puis du centre informatique (temps réel et gestion). À partir de 1974, il occupe divers postes hors informatique (comptabilité analytique, finances, audit). Il termine sa carrière comme directeur financier.

Retraite en octobre 2003.

Et les calculateurs CAE 133 ? Certains sont à Cherbourg après avoir effectué, sur le Redoutable, 20 ans de bons et loyaux services. En effet, à la différence des cinq autres sous-marins de la série, Le Redoutable n'a pas bénéficié de la refonte M4 et a donc conservé ses calculateurs CAE 133. Il a été retiré du service actif le 13 décembre 1991. En mai 2002, Le Redoutable est devenu le cœur de la Cité de la Mer à Cherbourg, un musée consacré à l'aventure industrielle de la propulsion nucléaire navale et à l'exploration sous la mer (<http://www.citedelamer.com>).

En avril 2010, Jacques Bisson a pu avoir accès aux locaux non ouverts au public : « Je reviens de Cherbourg, où j'ai accédé au Local Technique Missiles du « Redoutable » et constaté - à la lueur d'une lampe électrique - qu'a priori rien n'avait changé depuis l'armement : j'ai vu les 8 baies calculateurs, les 7 d'entrées-sorties, les unités à disques... ».

(voir la photo des calculateurs jointe au présent texte).

6. Quelques éléments de comparaison avec l'informatique de 2010

Cette chronique a relaté un travail pionnier réalisé avec des calculateurs et des logiciels conçus en 1960, à une époque où l'informatique était une activité balbutiante et artisanale.

La puissance du calculateur CAE 133 était faible, l'architecture du système était limitée. L'unité centrale fonctionnait à 1 MHz, la mémoire disponible était de 64 Kilooctets. Unité centrale et mémoire occupaient une armoire de 0,4 m³ (162 cm x 55 cm x 44 cm). Le CAE 133 n'avait ni disque dur interne, ni dispositif de pagination, donc il n'y avait pas de mémoire virtuelle. Le disque qui tenait lieu de disque dur externe avait 1 Mégaoctet avec un accès à 100 Kilooctets/s. Le chargement des programmes se faisait par un ruban perforé ; un téléimprimeur électromécanique flexowriter permettait d'entrer une instruction ou d'imprimer une ligne de caractères. La console de visualisation digitale, alors un matériel prototype et innovant, était commandée directement par le calculateur qui gérait aussi le rafraîchissement de l'image.

Le code instruction avait une allure de microprogrammes. À part un assembleur, il n'y avait pratiquement pas d'aide à la programmation, que ce soit un éditeur de texte, un macroassembleur, un langage structuré de compilation avec un compilateur, une base de donnée, un gestionnaire de versions ou de configurations, ...

Les programmes étaient écrits en un langage d'assemblage assez abscons et, faute de suffisamment de mémoire pour les contenir, il fallait réduire la taille du code au maximum, quitte à le rendre illisible, et partant, difficile à mettre au point et à maintenir. Il est arrivé plusieurs fois de reprogrammer une fonction plutôt que d'essayer de maintenir, modifier ou mettre au point, le code écrit par un programmeur qui avait quitté le centre de calcul. Comme il n'y avait pas de protection mémoire, le code du système n'était pas à l'abri des erreurs du code utilisateur ; toute erreur de programmation pouvait se propager partout.

Nous étions donc très loin de l'informatique de 2010, avant 50 ans d'une évolution fantastique et unique dans l'histoire des sciences et des technologies. Pour aider le lecteur, voici quelques éléments de comparaison avec 2010.

L'évolution du matériel a été portée par les extraordinaires progrès de la microélectronique et de la miniaturisation des composants.

Le CAE 133 avait une vitesse 10 fois inférieure à celle d'une carte à puce ou d'une carte SIM d'un téléphone portable ; sa mémoire contenait 10 fois moins d'information, et le tout dans un volume environ 1000 fois plus grand.

En effet, une carte SIM puissante peut comprendre, début 2011, une unité centrale à 32 bits avec une horloge à 10 Mhz, une mémoire RAM de 16 Ko, une mémoire ROM de 512 Ko, à laquelle s'ajoutent 512 Ko d'une carte EEPROM/FLASH ; et elle possède en plus un deuxième processeur entièrement dédié au calcul cryptographique

Pour environ 100 euros, on trouve en 2010 des disques durs externes offrant une capacité de stockage de 1 Téraoctets (avec cryptage), soit 1 million de fois plus que sur le disque de 14 pouces qui existait en 1960. Une clé USB de 64 Gigaoctets contient 64 000 fois plus de mémoire, dans un volume environ 30 fois plus petit.

L'interaction avec l'utilisateur se fait aujourd'hui par l'intermédiaire d'un « moniteur » ou d'une console graphique. Celle-ci peut comprendre un ou plusieurs processeurs graphiques, avec de la mémoire morte pour microprogrammer les commandes de visualisation et de la mémoire vive pour gérer en local le rafraîchissement d'écran et la gestion du fenêtrage. C'est un autre monde que celui du flexowriter ou de la console prototype à balayage cavalier que nous avons à programmer.

Les canaux d'entrée-sortie atteignent maintenant plusieurs GigaHerz, ce qui les fait 1000 fois plus rapides que ceux d'alors. Et les calculateurs peuvent être reliés par un réseau local, où la technologie dominante est Ethernet pour la plupart de 100 Mbits/s à 1 Gigabits/s), ou par un réseau général, ce qui à l'époque n'existait pas et n'était même pas envisagé.

Encore une comparaison. Un Macbook portable de 2010 comprend deux processeurs Intel à 2,26 GHz, une mémoire cache de 3 Mo, 4 Go de mémoire, un bus de 1 GHz, un disque dur de 250 Go. Tout cela tient dans un volume de 1056 cm³, ce qui est 400 fois plus petit que l'armoire du seul CAE 133. Et sur ce portable on peut brancher un disque dur externe et plusieurs clés USB.

Pour un projet comme celui que nous avons à programmer, on aurait aujourd'hui à notre disposition des machines très puissantes avec plusieurs jeux de 4 unités centrales (on dit des « cœurs ») à 64 bits fonctionnant à 200 MHz et avec 32 Mo de mémoire vive et 12 Mo de mémoire cache, plus des disques durs de 1 Téraoctets.

Venons-en au logiciel qui a beaucoup profité du développement de l'algorithmique.

On cite dans la partie consacrée à l'application PVA un programme d'analyse harmonique échantillonnée, qui utilise environ 5000 octets. Ce qui lui correspond en 2010 est un programme de transformée de Fourier discrète (appelée aussi FFT « Fast Fourier Transform ») qui, écrite en langage C, occupe de l'ordre de 4 Ko en langage source et 5 Ko en code objet.

De même on cite le programme de commande en gisement de la maquette du PVA. C'est essentiellement un programme de traitement des interruptions, qui réduit au minimum, et optimisé au maximum, n'occupait que 5000 octets. Ce programme rudimentaire est à comparer aux programmes de traitement d'interruption, beaucoup plus complets, qu'on trouve aujourd'hui. Ainsi dans le système LINUX, ou le système GCOS-7 (de la BULL), l'interruption est récupérée par un sous-programme de moins d'une centaine d'octets (dans CECOS-7 cette partie est microprogrammée), mais le programme complet, qui gère cette interruption dans son contexte et qui trouve le processus à lancer pour

répondre à cette interruption, atteint les 100 Ko.

Toute l'application tenait sur le CAE 133 en 128 Kilooctets, avec le moniteur, le traitement des interruptions, des entrées-sorties, des liaisons entre calculateurs. Le système d'exploitation du Macbook portable, cité plus haut, le Mac OS X 10, proche du système LINUX, occupe de l'ordre de 2,5 Go auxquels s'ajoutent de 5 à 10 Go pour les bibliothèques partagées. Il est certes bien plus compliqué, offre plus de fonctionnalités, et gère le traitement de processus concurrents. Côté applications, sur le Mac OS X 10, le code d'un navigateur comme Netscape, Safari ou Internet Explorer, occupe de l'ordre de 70 Mégaoctets (56 Mo pour Firefox, 93 Mo pour Google Chrome, et 48 Mo pour Safari) sans compter les bibliothèques partagées.

Avec notre CAE 133 et ses capacités limitées, on était bien encore au Moyen-âge, ou peut-être même à l'âge de pierre, de l'informatique !

On trouve beaucoup d'information sur internet. Pour l'histoire de l'architecture des ordinateurs, on peut consulter <http://en.wikipedia.org/wiki/Computer>.

Pour l'algorithmique, on peut aller voir :

http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_science.

Et pour le logiciel, on peut consulter :

http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_software.

7. Article publié en 1967 dans la revue R.I.R.O.

« Denis Derville, Claude Kaiser, Yves Peirottes, Pierre Tellier. Le système Haliotis, RIRO 1,6, pp. 3-25, 1967 »

La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (R.I.R.O.) était la revue de l'Association Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (AFIRO).

8. Remerciements

Je remercie tous les anciens du Centre Coelacanthé dont les souvenirs et les archives ont alimenté cette chronique, ainsi que Pierre-Éric Mounier-Kuhn⁹⁵, historien, qui m'a encouragé à l'écrire et qui m'a donné des éléments pour la situer dans son contexte historique.

⁹⁵Auteur de « L'informatique en France, de la seconde guerre mondiale au plan calcul », PUPS 2010.