

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

PARIS

MÉMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR C.N.A.M.

en

AUTOMATISME INDUSTRIEL

par

Denis BOUZIAT

**Contrôle commande d'une station d'essais
pour bobines supraconductrices :
application du réseau de terrain WorldFIP.**

Soutenu le 27 juin 2001

JURY

PRESIDENT : J.L. THOMAS (CNAM)

**MEMBRES : A. FAYAZ (CNAM)
B. HERVIEU (CEA)
D. JAUME (CNAM)
J.C. LANGUILLAT (CEA)
C.WALTER (CEA)**

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

PARIS

MÉMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR C.N.A.M.

en

AUTOMATISME INDUSTRIEL

par

Denis BOUZIAT

Contrôle commande d'une station d'essais

pour bobines supraconductrices :

application du réseau de terrain WorldFIP.

Les travaux relatifs au présent mémoire ont été effectués au Commissariat à l'Énergie Atomique au sein du Service d'Instrumentation Générale, sous la direction de Monsieur C. Walter et suivi au CNAM par Monsieur J.L. Thomas.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) à Saclay, dans le Service d'Instrumentation Générale (SIG) au sein du Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée (DAPNIA).

Je remercie sincèrement Monsieur J.C. Languillat, Chef de service du SIG, pour m'avoir accordé le temps nécessaire à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier Monsieur J.L. Thomas, mon tuteur au CNAM, qui a supervisé mon travail, ainsi que Messieurs A. Fayaz et D. Jaume pour avoir accepté d'être membres du jury.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur Ch. Walter, mon responsable au CEA qui, avec une grande compétence, m'a dirigé tout au long de ce travail. Les nombreux conseils et suggestions qu'il m'a apportés m'ont permis de mener à bien ce travail dans des conditions techniques et humaines encourageantes.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur B. Hervieu, pour le soutien et les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail, ainsi que sa présence et l'aide qu'il m'a apportée dans la rédaction de ce mémoire.

Je remercie tous les membres du projet W7X de Saclay, ainsi que mes collègues du groupe automatisme, que j'ai côtoyé pendant ces années et avec lesquels nous avons collaboré fructueusement.

Enfin, je dédie ce mémoire à mon épouse qui a montré une grande patience tout au long de mon parcours au CNAM et m'a fourni un soutien précieux dans la vie quotidienne.

Sommaire

INTRODUCTION	1
1. CONTEXTE.....	5
1.1. CEA / DSM / DAPNIA / SIG	5
1.1.1. <i>Le CEA</i>	5
1.1.2. <i>La DSM</i>	6
1.1.3. <i>Le DAPNIA</i>	6
1.1.4. <i>Le SIG</i>	7
1.1.5. <i>Le groupe automatisme</i>	8
1.2. PRESENTATION DU PROJET W7X ET DE LA STATION D'ESSAI DE SACLAY	9
1.2.1. <i>Aspect scientifique</i>	9
1.2.1.1. Description du projet W7X	9
1.2.1.2. Bobine Non-Plane	11
1.2.1.3. Bobine Plane	11
1.2.1.4. Constitution d'une bobine.....	11
1.2.2. <i>La station d'essai W7X à Saclay</i>	12
1.2.2.1. Objectif.....	12
1.2.2.2. Acquisition de données	13
1.2.2.3. Test des 70 bobines	17
1.3. ORGANISATION DU PROJET	20
1.3.1. <i>Organigramme service</i>	20
1.3.1.1. Organisation fonctionnelle de l'équipe projet pour les tests de qualification à Saclay	20
1.3.1.2. Organisation structurelle au sein du SIG.....	21
1.3.2. <i>Responsabilités du chargé d'affaire</i>	21
1.3.3. <i>Responsable d'automatisme</i>	22
2. PROCESSUS CRYOGENIQUE ET MESURES	25
2.1. INTRODUCTION.....	25
2.2. DESCRIPTION DU PROCESSUS CRYOGENIQUE	25
2.2.1. <i>Objectif</i>	25
2.2.2. <i>Les phases du processus</i>	25

2.3. CARACTERISTIQUES DES CHAINES DE MESURES.....	27
2.3.1. <i>Présentation de la chaîne de mesure</i>	27
2.3.2. <i>Résumé du type et du nombre de mesures</i>	28
2.3.3. <i>Représentation graphique simplifiée des différents types de voie de mesure</i>	29
2.4. SPECIFICATIONS D'EXPLOITATION	35
3. CONTROLE COMMANDE	42
3.1. INTRODUCTION.....	42
3.2. CONTEXTE.....	43
3.3. ARCHITECTURE PROPOSEE SUR W7X	49
3.4. JUSTIFICATIFS.....	49
3.4.1. <i>Description des sous-ensembles</i>	49
3.4.1.1. CABTF (Centrale d'Acquisition Basse Température Fipée).....	51
3.4.1.2. FESTO (Terminal de distributeurs pneumatique).....	58
3.4.1.3. Châssis CE80-35 d'entrées/sorties déportées	62
3.4.1.4. Niveau d'Hélium.....	64
3.4.2. <i>Communication et échange de données. (passerelles)</i>	67
3.4.2.1. Coupleur déporté FIP/MODBUS	67
3.4.2.2. Passerelle FIP/HART	73
3.5. SUPERVISION (UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE INTERNET).....	82
4. RESULTATS	87
4.1. INTRODUCTION.....	87
4.2. PROCESSUS CRYOGENIQUE	88
4.3. RESEAU WORLDFIP	90
4.4. COUPLEUR DEPORTE FIP/MODBUS.....	93
4.5. PASSERELLE FIP/HART	94
4.6. CABTF.....	96
4.7. SUPERVISION	96
CONCLUSION	98
BIBLIOGRAPHIE	100
ANNEXES	102

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Choix du système de contrôle commande	103
ANNEXE 2 : Compétences du groupes automatismes	106
ANNEXE 3 : Schémas cryogéniques	107
ANNEXE 4 : Nomenclature	110
ANNEXE 5 : Implantation	112
ANNEXE 6 : Voies de mesures	120
ANNEXE 7 : Représentation graphique simplifiée des différents types de voie de mesure.	125
ANNEXE 8 : BORA (B Ornier de R accordement A nalogique).....	127
ANNEXE 9 : Grafjets du processus général du cryostat 1	138
ANNEXE 10 : Spécification du coupleur déporté FIP/MODBUS	139
ANNEXE 11 : Le protocole MODBUS	146
ANNEXE 12 : Grafjet et Programme de la gestion MODBUS.....	150
ANNEXE 13 : Sous programme de calcul de FIT des sondes de température Cernox	164
ANNEXE 14 : Instrumentation	165

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1	: Le Stéllarator	10
Figure 1-2	: Bobine Non-Plane	11
Figure 1-3	: Bobine Plane	11
Figure 1-4	: Conducteur	11
Figure 1-5	: Boîte à bobine	12
Figure 1-6	: Sections de conducteurs (même capacité de transport).....	12
Figure 1-7	: Schéma de l'ensemble des cryostats.....	13
Figure 1-8	: Schéma de principe des systèmes	14
Figure 1-9	: Schéma de principe du système d'acquisition.....	15
Figure 1-10	: Schéma de principe des futurs systèmes	16
Figure 1-11	: Courbe de monté du courant	19
Figure 2-1	: Schéma de la voie de mesure de la température	29
Figure 2-2	: Courbe d'étalonnage de sondes Cernox	30
Figure 2-3	: Mise à l'échelle du module d'entrée de courant analogique.....	31
Figure 2-4	: Mise à l'échelle sondes Cernox par $R = f(I)$	32
Figure 2-5	: Courbe sondes Cernox $1/T = f(\ln(R))$	32
Figure 2-6	: Courbe d'une sonde Platine.....	34
Figure 2-7	: Mise à l'échelle d'une sonde Platine par $R = f(I)$	34
Figure 2-8	: Schéma de l'échange avec les postes de supervisions.....	37
Figure 3-1	: Principe de diffusion des informations du réseau WorldFIP	47
Figure 3-2	: Architecture réseau WorldFIP	49
Figure 3-3	: Photo de la CABTF.....	51
Figure 3-4	: Comparaison des solutions de la CABTF.....	52
Figure 3-5	: Courbe température sonde cernox.....	54
Figure 3-6	: Schéma de l'échange des données transmises de la CABTF.....	55
Figure 3-7	: Schéma du synchronisme de la CABTF	57
Figure 3-8	: Chronogramme du synchronisme de la CABTF.....	57
Figure 3-9	: Photo du FESTO	58
Figure 3-10	: Comparaison des solutions du FESTO	59
Figure 3-11	: Schéma de l'échange des données transmises du FESTO.....	60
Figure 3-12	: Schéma de principe du concentrateur d'E/S CE80-35	62
Figure 3-13	: Mode de marche du concentrateur d'E/S CE80-35	63
Figure 3-14	: Tiroir de mesure d'hélium prototype 4 voies	64
Figure 3-15	: Ordonnancement des échanges MODBUS	67
Figure 3-16	: Durée d'un échange type demande réponse en binaire	68
Figure 3-17	: Photo du coupleur déporté FIP/MODBUS	69
Figure 3-18	: Architecture du coupleur déporté FIP/MODBUS.....	70
Figure 3-19	: Lectures des données par le coupleur FIP/MODBUS	71
Figure 3-20	: Ecritures des données par le coupleur FIP/MODBUS.....	72
Figure 3-21	: Photo de la passerelle FIP/HART	73
Figure 3-22	: Schéma fonctionnel FIP/HART	74
Figure 3-23	: Hart utilise FSK pour le codage numérique de l'information par-dessus le signal 4-20mA	75
Figure 3-24	: Superposition du signal numérique sur le signal analogique.....	76
Figure 3-25	: Architecture générale du mécanisme affectation du n°IP	78
Figure 3-26	: Application AMS - vue de la connexion des capteurs	79
Figure 3-27	: Panneau de configuration des propriétés d'un capteur de AMS	80
Figure 3-28	: Panneau de configuration des propriétés d'un capteur de AMS	81

Figure 3-29 : Vues du poste de supervision.....	82
Figure 3-30 : Principe de fonctionnement du poste de supervision.....	84
Figure 3-31 : Serveur Web embarqué.....	85
Figure 4-1 : Descente en vide du cryostat 1	88
Figure 4-2 : Photo des baies	89
Figure 4-3 : Photo du hall avec les cryostats.....	89
Figure 4-4 : Les cycles de début et de fin d'une trame.....	90
Figure 4-5 : Format de la trame WorldFIP.....	90
Figure 4-6 : Une série de trame FIP	91
Figure 4-7 : Chronogramme du réseau FIP	92
Figure 4-8 : Vue à l'oscilloscope d'une requête MODBUS	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Mesures du satellite	28
Tableau 2-2 : Mesures des deux boîtes à vannes	28
Tableau 2-3 : Mesures des deux cryostats	29
Tableau 2-4 : Volume des variables logiques	36
Tableau 2-5 : Volume des variables analogiques	36
Tableau 2-6 : Quantités de trames pour la supervision.....	39
Tableau 3-1 : Comparatif des coûts CABTF	53
Tableau 3-2 : Identificateurs des variables FIP pour la CABTF	56
Tableau 3-3 : Comparatif des coûts FESTO	60
Tableau 3-4 : Identificateurs des variables FIP pour le FESTO	61
Tableau 3-5 : Calculs des durées d'échanges MODBUS	68
Tableau 3-6 : Identificateurs des variables FIP pour la DI80	74

Dans le tableau ci-dessous, on donne les symboles et leurs unités usuelles utilisées dans le document.

Grandeur		Unité	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Longueur	l	mètre	m
Masse	m	kilogramme	kg
Temps	t	seconde	s
Courant électrique	i	ampère	A
Température	T	kelvin	K
Résistance électrique	R	ohm	?
Energie	W	joule	J
Induction magnétique	B	tesla	T
Pression	P	bar	b
Superficie	S	mètre carré	m ²
Volume	V	mètre cube	m ³
Fréquence	f	hertz	Hz
Tension - ddp	U	volt	V
Vitesse	V	Bauds (bits/seconde)	b/s

Formation des multiples et sous multiples des unités.

Multiplicateur de l'unité	Préfixe du nom de l'unité	Symbole placé devant l'unité
Multiples		
10 ¹²	téra	T
10 ⁹	giga	G
10 ⁶	méga	M
10 ³	kilo	k
10 ²	hecto	h
10	deca	da
Sous multiples		
10 ⁻¹	déci	d
10 ⁻²	centi	c
10 ⁻³	milli	m
10 ⁻⁶	micro	?
10 ⁻⁹	nano	?
10 ⁻¹²	pico	p

LEXIQUE

API = Automate Programmable Industriel.

APPLETS = Programme informatique écrit en langage Java. Les applets sont identiques à des applications, à la différence qu'il ne fonctionnent pas en autonomes. En effet, ils suivent un ensemble de conventions grâce auxquelles ils peuvent s'exécuter dans un navigateur compatible Java.

BOOTP = Bootstrap Protocol est un protocole de démarrage de terminaux X ou stations sans disque qui utilise UDP comme couche de transport. Il sert principalement à fournir son adresse IP à une machine que l'on démarre sur un réseau.

DLL = Dynamic Link Library, elles sont des bibliothèques de routines (fonctions ou procédures) chargées en mémoire au moment de leur appel. Toutes les routines d'une DLL sont alors disponibles à tous les programmes Windows en cours d'exécution. Ce système permet d'éviter la redondance et le gaspillage de mémoire : il suffit de charger une DLL une seule fois en mémoire pour que toutes ces routines soient accessibles à tous les autres programmes. La structure d'une DLL ne diffère pas beaucoup d'un programme EXE mais seuls quelques langages de haut niveau peuvent générer de tel fichier.

DLL = Data Link Layer, la couche liaison de données - Couche 2 du modèle OSI (Open System Interconnection model).

E/S = Entrées/Sorties.

EPICS = Experimental Physics and Industrial Control System.

HTML = Hyper Text Markup Language : langage de description de document hypertexte. C'est ce langage qui est utilisé pour décrire les documents que l'on trouve sur le Web.

HTTP = Hyper Text Transmission Protocol : Protocole standard de transmission pour le dialogue entre le client et le serveur Internet.

IP = Internet Protocol, Protocole de transfert et de routage des données utilisé dans l'Internet, Ce protocole utilise un schéma d'adressage standard composé d'adresse unique pour chaque ordinateur connecté au réseau.

JAVA = C'est un langage de programmation orienté objet développé par Sun Microsystems. Vous pouvez concevoir des programmes (des applets) qui s'exécuteront automatiquement sur une page WEB. Ceux-ci sont souvent utilisés pour animer du texte ou créer des boutons de navigation dynamiques.

LCD = Afficheur à cristaux liquides.

NDIS = Network Device Interface Specification (spécification d'interface de pilote de réseau avec les périphériques matériels).

ppm = part pour million : 1 ppm = 1 molécule d'un constituant pour 1 million de molécule d'un autre constituant.

TCP = Transmission Control Protocol, Protocole principal destiné à gérer les échanges d'information entre les ordinateurs reliés en réseau.

UDP = User Datagram Protocol, Protocole de la couche transmission du protocole TCP/IP qui fournit un service sans connexion pour la transmission sans accusé de réception de paquets de données.

VME = Versa Module Eurocard. Structure de bus pour les système 8,16 et 32 bits. Bus multi-microprocesseur.

WorldFIP = World Fieldbus Industrial Protocol ou Monde Flux Information Process.

INTRODUCTION

Introduction

Les essais d'aimants supraconducteurs de grande taille demandent une rigueur de contrôle telle que nous sommes amenés à faire évoluer en permanence l'instrumentation et le contrôle de processus pour faire face à une demande croissante de qualité des mesures et de sécurité des installations.

Dans ce cadre nous venons de développer à Saclay une nouvelle installation de test destinée aux essais des 70 aimants de la machine de fusion W7X¹ à construire dans les 10 ans à venir.

Ces aimants mesurant entre 3 et 4 m de diamètre et développant un champ magnétique de 4 Teslas, demandent toute notre attention en matière de contrôle commande et de mesure pour éviter des incidents techniques qui pourraient être destructeurs.

Dans ce cas particulier, le cahier des charges découle des données constructeur (IPP² Garching). Les marges principales de contrôle pour piloter un essai ont été ainsi fixées à :

? 0,05 Kelvin à 4,5 Kelvin (-268,65 °C),

?? 5 Ampères à 17600 Ampères,

?? 150 ms pour le temps de cycle qui assure le contrôle des 1060 paramètres physiques de la station.

De plus, Il faut, noter qu'à ces contraintes viennent s'ajouter celles dues au champ magnétique des bobines ; on comprendra ainsi, que notre difficulté majeure est d'assurer des contrôles et des mesures de précision dans un environnement très perturbé tant du point de vue électrique que magnétique.

Nous sommes donc dans un domaine où l'automatisme est une nécessité et où toutes solutions pouvant amener un gage de qualité pour les mesures et, par conséquent, pour le contrôle sont bienvenues.

Nos choix ont été : ? De déporter les mesures aux endroits les plus judicieusement placés par rapport aux champs magnétiques.

?? De limiter au minimum les longueurs de câble de mesures, qui sont sensibles aux parasites.

¹ Le stellarator Wendelstein 7-X.

² IPP : Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.

?? De réduire le temps de cycle de l'automate à la logique de contrôle de surveillance minimum.

Tout cela nous amène à l'utilisation de capteurs et actionneurs "intelligents" couplés à un réseau de terrain qui doit à la fois nous préserver des problèmes de parasites mais aussi assurer, en toute sécurité, la circulation des informations dans le temps de cycle requis.

De longue date à Saclay, et notamment le groupe dans lequel je travaille, avons choisi WorldFIP¹ pour standard de réseau de terrain.

Pour cette application, nous avons donc bâti notre architecture de contrôle commande autour de ce réseau, qui nous a permis à la fois de respecter notre cahier des charges et d'ouvrir la communication avec des passerelles HART et MODBUS² sur lesquelles j'ai travaillé plus particulièrement.

Nous avons également beaucoup analysé le problème de la répartition des informations analogiques sur les différents systèmes d'acquisition. Ainsi, comme la solution réseau ne permettait pas de répondre, par exemple pour les 46 voies à 20 kHz, nous avons dû développer des borniers spécifiques de distribution des informations analogiques.

L'organisation de mon mémoire est réalisée de la façon suivante :

?? Le premier chapitre situe le contexte dans lequel j'ai réalisé ce mémoire. Une description du projet W7X est détaillée, ainsi que la présentation de la station d'essai des bobines de W7X sur le site de Saclay. J'expose aussi le suivi de l'organisation du projet, les rôles de chargé d'affaire et de responsable des automatismes qui m'ont été confiés.

?? Le second chapitre décrit les phases du processus cryogénique de l'installation. Je présente également une analyse consacrée aux caractéristiques des chaînes de mesure. Des commentaires sur les spécifications d'exploitations sont expliqués afin d'assurer la mise au point du processus.

?? Le troisième chapitre est dédié au contrôle commande de l'installation, et à la description de l'architecture du réseau de terrain, et des différents produits qui composent l'installation.

?? Le dernier chapitre détaille la validation des résultats obtenus.

¹ WorldFIP = World Fieldbus Industrial Protocol.

² MODBUS est une marque déposée de Gould Modicon.

Chapitre 1

CONTEXTE

1. Contexte.

1.1. CEA / DSM / DAPNIA / SIG.

Ce mémoire a été réalisé au sein du Service d'Instrumentation Générale CEA / DSM / DAPNIA / SIG.

1.1.1. Le CEA.

Créé en 1945, le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) est un établissement public de recherche, chargé de donner à la France la maîtrise de l'atome et de ses applications dans les domaines de la recherche, de l'énergie, de l'industrie, de la santé et de la défense. Il fournit aux pouvoirs publics, aux industriels et au public, l'expertise scientifique et technique de référence dans ses missions, garantie par une évaluation externe. Il propose des palettes de solutions pour que les décideurs puissent prendre, à tout instant et en toute connaissance de cause, les solutions les mieux adaptées. Il conduit des recherches dans les domaines où il a acquis des compétences spécifiques, qui permettent de contribuer aux grandes priorités nationales tant en recherche fondamentale qu'en recherche technologique. La pluridisciplinarité est l'un des atouts majeurs du CEA, qui offre une grande diversité de métiers à tous les niveaux de qualification.

?? Effectif : 15941 personnes (au 31/12/1999) dont environ 46,5 % de cadres, ingénieurs, chercheurs.

?? 672 embauches réalisées en 1999.

?? Budget : 18,6 milliards de francs en 1999.

?? 1553 brevets en portefeuille fin 1999, dont 217 déposés en 1999.

?? 1 235 accords avec des grands groupes français des PME françaises, ou des organismes de recherche français et étrangers au 31/12/1999

Le centre de Saclay :

La part du centre de saclay dans les programmes du CEA est de l'ordre de 30 %. Le centre se répartit en 7 directions opérationnelles : les Applications Militaires, les Réacteurs Nucléaires, les **Sciences de la Matière**, le Cycle du Combustible, les Technologies Avancées, les Sciences du Vivant, l'Informatique Scientifique et Technique.

1.1.2. La DSM.

*Direction des Sciences de la Matière.
Recherche fondamentale en Physique et Chimie.*

La DSM comprend près de 1900 chercheurs, ingénieurs et techniciens. Elle rassemble les activités de recherche en physique, physico-chimie, sciences de la terre et de l'environnement.

Elle contribue à :

- ?? Maintenir ouverte l'option du nucléaire.
- ?? Préparer l'avenir à travers les retombées de la recherche fondamentale.
- ?? Repousser les frontières de la connaissance.

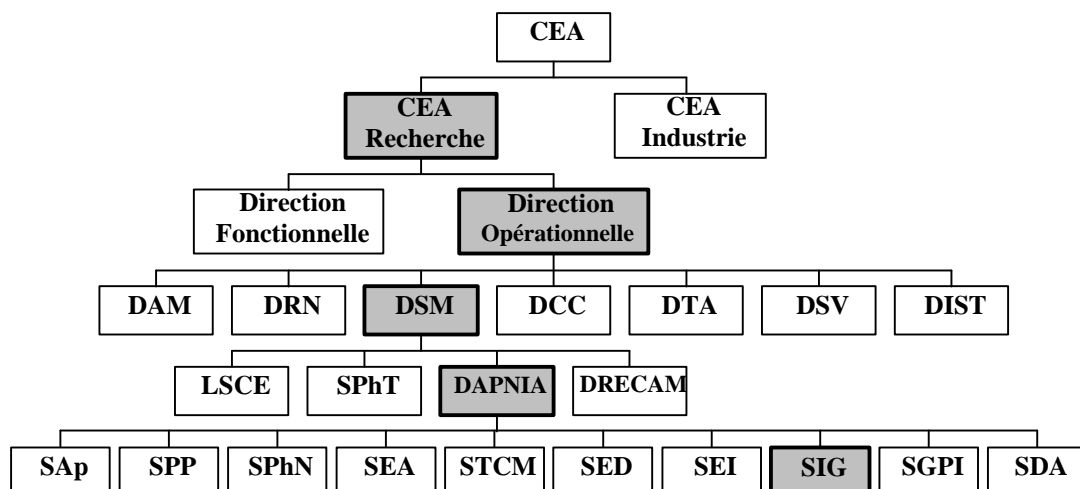
Elle se décompose en plusieurs départements parmi lesquels le **DAPNIA**.

1.1.3. Le DAPNIA.

Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée.

Le DAPNIA est une unité de recherche fondamentale, dont les thèmes s'étendent des particules élémentaires et noyaux atomiques aux amas de galaxies. Il développe l'instrumentation de haute technologie nécessaire à ces recherches. Il y a 700 physiciens, ingénieurs et techniciens qui travaillent actuellement au DAPNIA, répartis dans les services suivants :

- ?? Le Service d'Astrophysique (SAp)
- ?? Le Service de Physique des Particules (SPP)
- ?? Le Service de Physique Nucléaire (SPhN)
- ?? Le Service d'Etude des Accélérateurs (SEA)
- ?? Le Service des Techniques de Cryogénie et de Magnétisme (STCM)
- ?? Le Service d'Etude des Détecteurs (SED)
- ?? Le Service d'Electronique et d'Informatique (SEI)
- ?? **Le Service d'Instrumentation Générale (SIG)**
- ?? Le Service de Gestion des Programmes et d'Ingénierie (SGPI)
- ?? Le Service de Déclassement des Accélérateurs (SDA)



1.1.4. Le SIG.

Service d'Instrumentation Générale.

Le SIG est chargé de l'instrumentation et du contrôle commande des instruments de physique, qui peuvent être installés dans différents laboratoires nationaux et internationaux. Il en assure l'étude, la réalisation et la maintenance en s'appuyant sur des techniques de pointe, des solutions originales et des moyens de contrôle et de mesure pour les valider.

Les objectifs du service sont les suivants :

- ?? Concevoir des dispositifs de contrôle commande industriels fiables et performants avec supervision à distance pour les installations déportées ou situées à l'étranger.
- ?? Assurer le développement d'une instrumentation de précision, numérique, intelligente et interfacée sur le réseau de terrain normalisé Européen WorldFIP [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7].
Cet axe de développement autour de ce réseau de terrain associé à la gamme d'automate industriel (Alstom) a été pris en 1992 par le SIG suivant des critères résumés en annexe 1.
- ?? Concevoir des chaînes de mesures de hautes résolutions avec système d'acquisition et traitement des données.
- ?? Etudier et réaliser des systèmes automatiques avec asservissement de précision.
- ?? Renforcer ses collaborations avec les laboratoires extérieurs et les industriels pour échanger ou transférer ses développements instrumentaux.

Pour tenir ses objectifs le service dispose des moyens suivants :

- ?? Des équipes pluridisciplinaires composées de 21 ingénieurs et 46 techniciens spécialisés en automatisme, électronique instrumentale, génie électrique, informatique industrielle et mesures physiques.
- ?? Des postes de CAO et DAO électronique et génie électrique.
- ?? Un laboratoire de développement et de caractérisation de capteurs optiques.
- ?? Des ateliers de programmation pour calculateurs et automates programmables.
- ?? Des plates-formes d'essai et de qualification de capteurs et actionneurs.

1.1.5. Le groupe automatisme.

Le groupe se compose de 8 personnes qui comprend 3 ingénieurs, 4 techniciens et un étudiant en formation par alternance.

Activités principales :

Ce groupe d'automatisme est chargé de l'étude et la réalisation de systèmes de contrôle commande utilisés dans les expériences de physique des particules, physique nucléaire et astrophysique. Les systèmes sont architecturés autour d'API¹ ALSTOM couplés au réseau de terrain normalisé WorldFIP et à des postes de conduite sur PC, assurant également le rôle de passerelle TCP/IP² avec le réseau Internet. Ce groupe est particulièrement spécialisé dans l'instrumentation cryogénique associée aux détecteurs des expériences de physique et dans le développement d'informatique industrielle sur PC dans le cadre d'applications très spécifiques.

Applications de contrôle commande :

?? Physique des particules : ATLAS cryostat de test du calorimètre (CERN Genève).

CMS table de scanning (CERN Genève).

?? Physique nucléaire : CLAS cibles cryogéniques (CEBAF USA).

MINI-INCA transmutation dans différents types de flux
neutroniques (ILL-Grenoble).

?? Astrophysique : EROS MARLY caméra CCD sur télescope (Chili).

MEGACAM caméra CCD sur télescope (Hawaii).

?? Cryogénie : Station de liquéfactions d'hélium (STCM Saclay).

Station d'essais des aimants supraconducteurs à 1,8 K (STCM Saclay).

Station d'essais pour aimant supraconducteur W7X (STCM Saclay).

¹ API = Automate Programmable Industriel

² TCP/IP = Transmission Control Protocol / Internet Protocol.

1.2. Présentation du projet W7X et de la station d'essai de Saclay.

1.2.1. Aspect scientifique.

1.2.1.1. Description du projet W7X.

Le stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) (Figure 1-1) est un nouveau dispositif dans la lignée des stellarators du Max Planck Institut Für Plasmaphysik (IPP) de Garching (Allemagne). Un stellarator est une machine magnétique destinée à réaliser un anneau de fusion contrôlée. Le design de W7-X est basé sur des principes physiques, qui ont été discutés suite aux résultats expérimentaux du stellarator W7-AS. L'expérience vise à démontrer l'aptitude à un état stable naturel des stellarators à générer les paramètres de plasma utiles à un réacteur à fusion nucléaire. Ces bobines supraconductrices permettent un fonctionnement continu de ce type de machine. Ce système magnétique est destiné à confiner le plasma. Cet ensemble d'aimants supraconducteurs du stellarator est composé de 50 bobines non-planes (Figure 1-2) et 20 bobines planes (Figure 1-3), de diamètres respectifs 2,7 m et 3,2 m, arrangées de manière torique pour un diamètre moyen du tore de 11 m. L'énergie magnétique stockée dans le tore est de l'ordre de 600MJ, et champ magnétique axial est de 3 teslas.

La technique retenue pour le conducteur de ces aimants est celle du câble à refroidissement forcé "cable in conduit". Le fluide de refroidissement est l'hélium supercritique pressurisé à une température de l'ordre de 4,5 K et le courant d'alimentation des bobines est de 18000A.

Après leur fabrication et avant leur installation définitive sur W7X, les 70 bobines devront être réceptionnées et testées au C.E.A. Saclay.

Le Stéllarator.

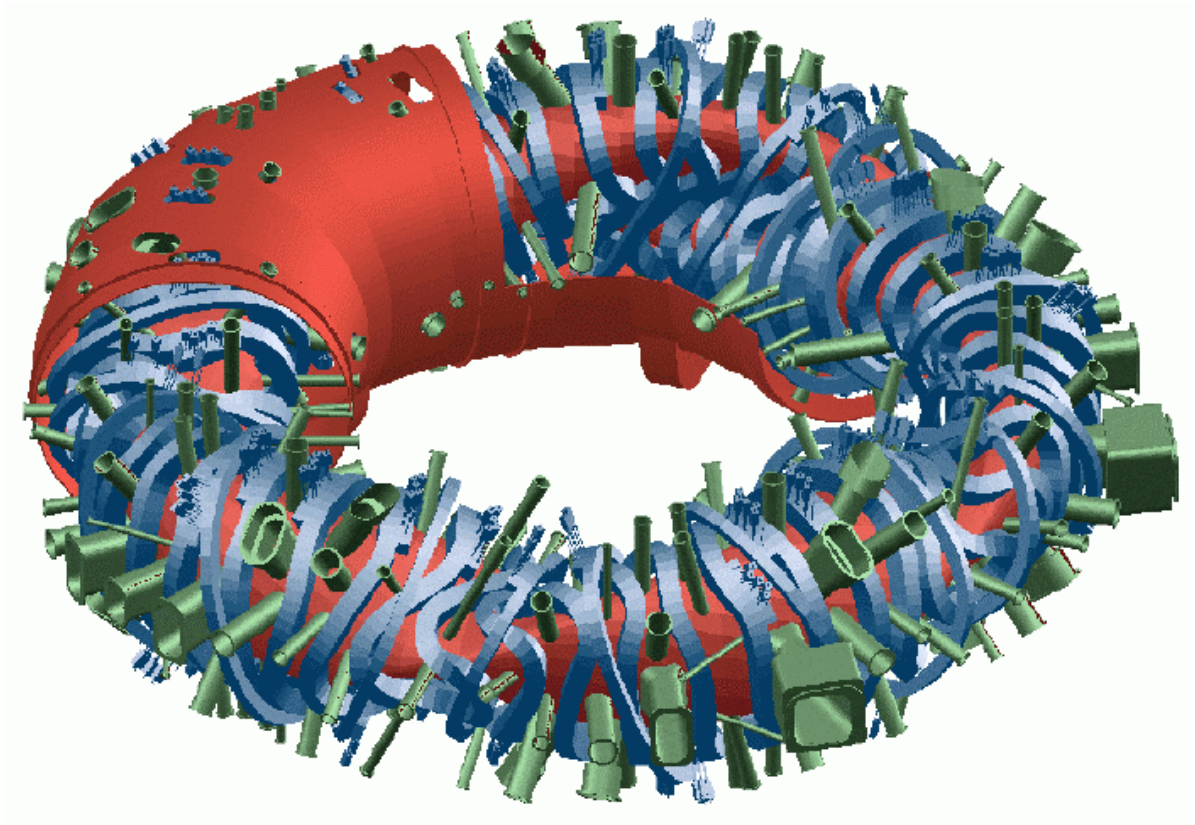


Figure 1-1 : Le Stéllarator.

?? Structure	10 demi-modules
?? Demi-module	5 bobines twistées "dites Non-Planes" et 2 bobines de correction "dites Planes"
?? ? du tore	11 Mètres
?? ? ext. de la machine	15 Mètres
?? B sur l'axe	3 Tesla
?? B sur le conducteur	6,2 Tesla
?? M masse froide	350 Tonnes
?? Refroidissement	He supercrit.(3,8 K)
?? Conducteur	"cable in conduite"

1.2.1.2. Bobine Non-Plane.

Température = 4,5 K

Pression = 6 bars

Courant = 17,6 kA

Champ max du conducteur = 5,2 T

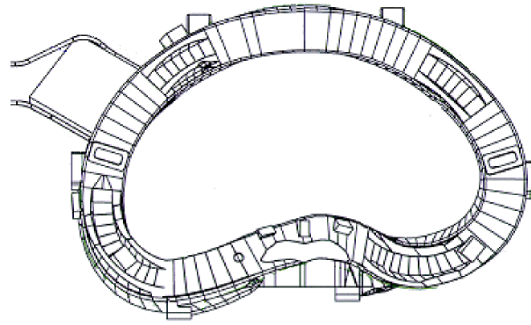


Figure 1-2 : Bobine Non-Plane.

1.2.1.3. Bobine Plane.

Température = 4,5 K

Pression = 6 bars

Courant = 16 kA

Champ max du conducteur = 1,98 T

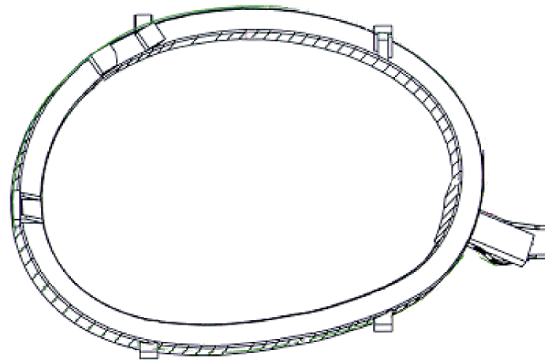


Figure 1-3 : Bobine Plane.

1.2.1.4. Constitution d'une bobine.

Les bobines sont fabriquées par des industriels (la société Tesla pour les bobines planes, et la société Ansaldo Energia et Noell pour les bobines non-planes). Le câble supraconducteur est constitué de plusieurs brins de niobium titane (Nb Ti) qui sont maintenus dans une gaine de section carrée (Figure 1-4), avec un taux de vide de 35% qui permet le passage de l'hélium de refroidissement.

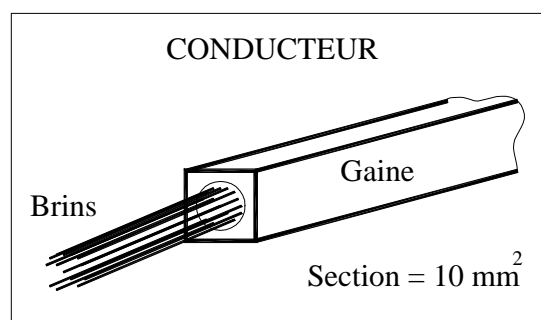


Figure 1-4 : Conducteur.

Le câble de section carrée, est enroulé en spire formant plusieurs couches. Cet ensemble est maintenu dans une boîte à bobine (Figure 1-5) et confiné par imprégnation d'époxy, afin de retenir le conducteur des forces engendrées par le champ magnétique de forte puissance.

Pour que la bobine soit supraconductrice, elle est installée dans une chambre à vide isolée (Cryostat), puis elle est refroidie par circulation d'hélium à l'intérieur du câble et autour de la boîte à bobine.

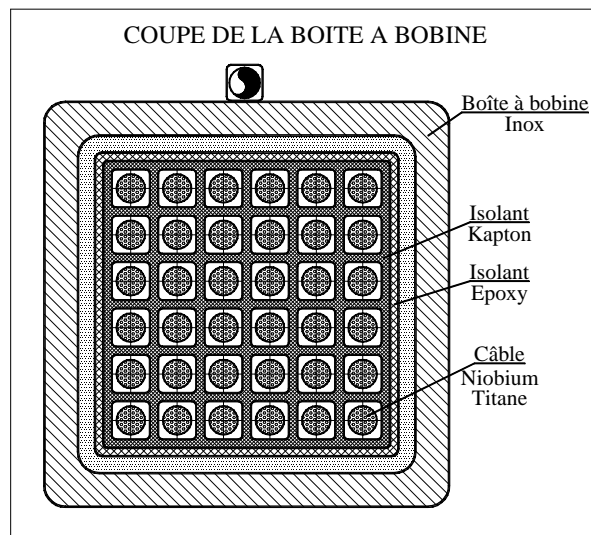


Figure 1-5 : Boîte à bobine.

La figure 1-6 donne les gains en compacité obtenus avec l'augmentation de la densité de courant. Ces sections qui, à l'échelle de ce dessin, correspondraient au transport d'environ 5 kA montrent bien l'intérêt de l'usage des supras lorsqu'il faut concevoir des aimants compacts qui fonctionnent vers 20 kA.

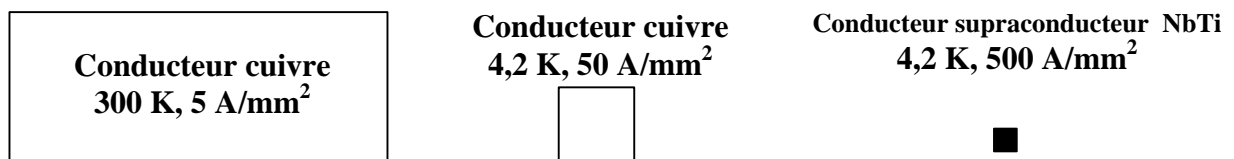


Figure 1-6 : Sections de conducteurs (même capacité de transport).

1.2.2. La station d'essai W7X à Saclay.

1.2.2.1. Objectif.

Le service des techniques de cryogénie et de magnétisme (STCM) du DAPNIA a pris en charge la réception et le test des 70 bobines. Il a confié au SIG la réalisation du contrôle commande et l'instrumentation associée de la station d'essai du projet W7X. Cette installation

sert au conditionnement sous vide isolé des bobines, grâce à deux cryostats, pouvant recevoir chacun deux bobines. La station effectue, par l'intermédiaire de l'instrumentation, toutes les mesures nécessaires à la qualification des bobines. Afin de rendre les bobines supraconductrices, une descente en température est essentielle, d'où l'utilisation d'un liquéfacteur d'hélium comme source de froid. Les fluides du liquéfacteur sont acheminés par une ligne de transfert et centralisés dans un cryostat de service nommé le satellite ; Celui-ci fait l'aiguillage des fluides vers deux boîtes à vannes, d'où l'hélium hypercritique est ensuite transmis aux deux bobines de chaque cryostat. (Voir la Figure 1-7 ci-dessous)

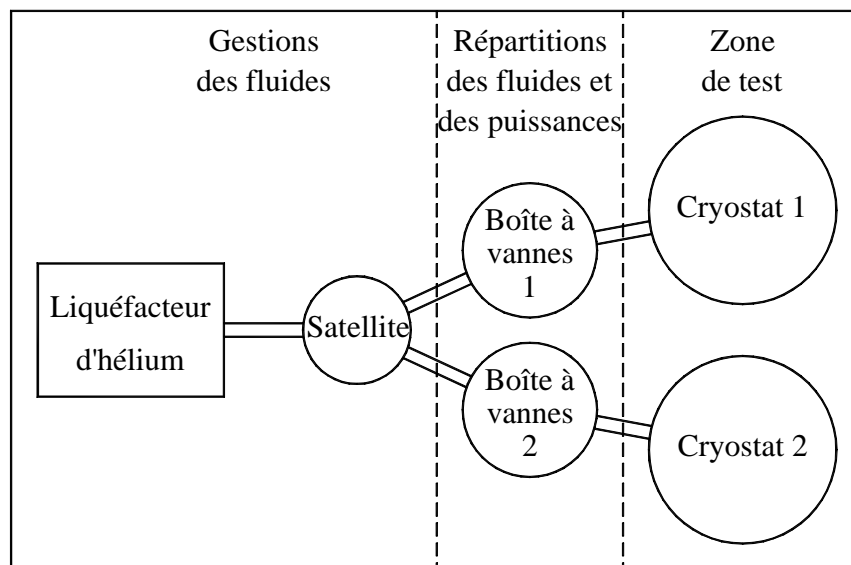


Figure 1-7 : Schéma de l'ensemble des cryostats.

1.2.2.2. Acquisition de données.

Le cahier des charges fonctionnel des acquisitions utiles aux essais des bobines W7X nous a été fourni. Il comprend les fréquences d'acquisition désirées (avec ou sans filtrage numérique) correspondant au nombre de points par unité de temps dont nous pensons avoir besoin pour mener au mieux le suivi de ces essais. Pour chaque type d'acquisition, cette valeur est optimisée pour restituer, en post-traitement, le maximum d'informations en fonction des grandeurs regardées. Il faut donc s'attendre à enregistrer ces informations dans leur intégralité à la fréquence exprimée. Dans le cadre de la rédaction d'un certificat de test final, nous ferons appel, en majorité, à une fonction de réduction de cette fréquence pour l'édition des documents ne relatant pas d'incident particulier. Seules les phases inattendues ou les incidents donneront lieu à l'édition de courbes aux fréquences d'acquisition demandées.

La fréquence d'acquisition lente demandée est de 0,1 Hz à 500 Hz, et la fréquence d'acquisition rapide est à 20 kHz.

Pour les besoins de la station d'essais W7X, nous avons installé trois systèmes d'acquisitions distincts. Le premier vient de l'exploitation des mesures connues de l'Automate Programmable Industriel (API) qui gère le contrôle commande de l'installation. Le second et le troisième systèmes sont identiques (un pour chaque cryostat), ils sont dédiés chacun à l'acquisition des données lentes et rapides. L'ensemble des données archivées sera restitué à nos collègues de IPP en Allemagne.

La figure 1-8 représente le schéma de principe des systèmes d'acquisitions de l'installation qui a été réalisé.

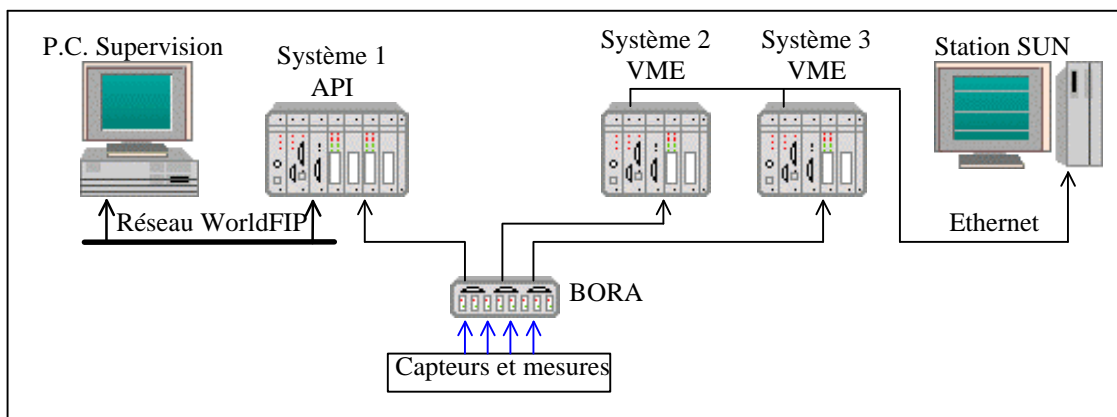


Figure 1-8 : Schéma de principe des systèmes.

Les liaisons de ces trois systèmes ont nécessité le développement des borniers de raccordement analogique appelé "BORA". De part la quantité importante des différents types de capteurs, ils ont permis le regroupement et l'isolement des mesures afin de faciliter la configuration des voies de mesures. Une spécification de ces borniers est donnée en annexe 8.

Le système d'acquisition par l'API pour le contrôle commande de l'installation trouve sa limite dans la fréquence, encore un peu lente, de scrutation des voies de mesure.

Pour des fréquences de scrutation plus rapide :

Le système d'acquisition "lente" et "rapide" est réalisé à partir d'un ordinateur au standard de bus VME¹. L'expérience et les compétences du groupe informatique sont reconnues dans ce domaine. Les cartes du système ont déjà été testées pour cet usage dans nos laboratoires et elles correspondent parfaitement à nos besoins. En particulier la qualité des

¹ VME = Versa Module Eurocard. Structure de bus pour les système 8,16 et 32 bits. Bus multi-microprocesseur.

mesures est excellente en résolution effective de 14 bits et les fonctionnalités logicielles de cette carte sont adaptées à leur utilisation dans cette acquisition à cadence élevée.

Le principe du système d'acquisition est représenté par le schéma de la figure 1-9. Les données reçues des signaux analogiques d'entrées sont dirigées sur deux voies distinctes. Dans le premier cas, une surveillance permanente est faite avec l'environnement EPICS¹. Ces outils assurent l'archivage régulier des différents paramètres. Dans le second cas, le stockage direct sur disque est déclenché dès l'apparition d'un "Quench" de la bobine. Le "Quench" est le moment où la bobine passe de l'état supra-conductrice à l'état résistif. Cet événement se produit sur une portion du conducteur. Pour ne pas endommager la bobine, nous garantissons sa protection par une décharge rapide à travers une résistance de 20 m Ω .

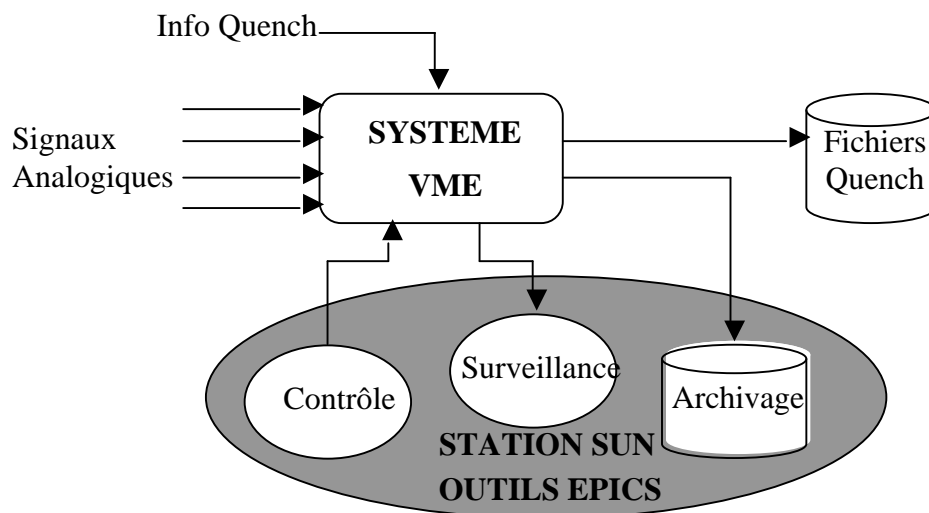


Figure 1-9 : Schéma de principe du système d'acquisition.

Le système est conçu avec un châssis VME. Une station est équipée de deux CPU, une Unité Centrale (U.C.) principale qui gère les cinq cartes d'entrées analogiques 32 voies différentielles isolées et une U.C. dédiée à l'acquisition rapide avec les deux cartes d'entrées analogiques 16 voies isolées. Un résumé du type et du nombre de mesures est présenté paragraphe 2.3.1. Les phases de vitesse d'acquisition sont indiquées en page suivante.

¹ EPICS = Experimental Physics and Industrial Control System.

Module lent pour l'acquisition des capteurs lents.

	Canal Moyenne Fréquence	Canal Haute Fréquence
Phase 1 (sans courant)	0,1 Hz	0,1 Hz
Phase 2 (avec courant)	1 Hz	10 Hz
Phase Quench	500 Hz	500 Hz

Module rapide pour l'acquisition des prises de potentiels.

Phase Quench 32 paramètres à 20 kHz sur une fenêtre de 100 secondes.

L'exploitation informatique des mesures sera faite sur stations SUN. Le système est configuré à partir des panneaux de configuration et de calibration pour chaque voie. Un écran propose les paramètres d'acquisition. Des vues de supervision affichent les valeurs correspondant aux différents circuits électriques et hydrauliques. Les données d'archivages sont stockées pour être ensuite visualisées sous la forme de courbes pendant ou après un test.

Solutions envisagées pour les perspectives futures.

L'analyse de la problématique d'acquisition montre que le partage des voies de mesures entre un API et un système d'acquisition devient une nécessité pour une grande partie des informations. La figure 1-10 propose un système frontal modulaire (module A) assurant la scrutation des mesures et le transfert de données avec le système (API) à travers le réseau WorldFIP de façon permanente. Le module B permettant l'acquisition des autres mesures vers la station de travail, cette partie pouvant être interrompue pour effectuer les étalonnages des cartes de mesure et la maintenance.

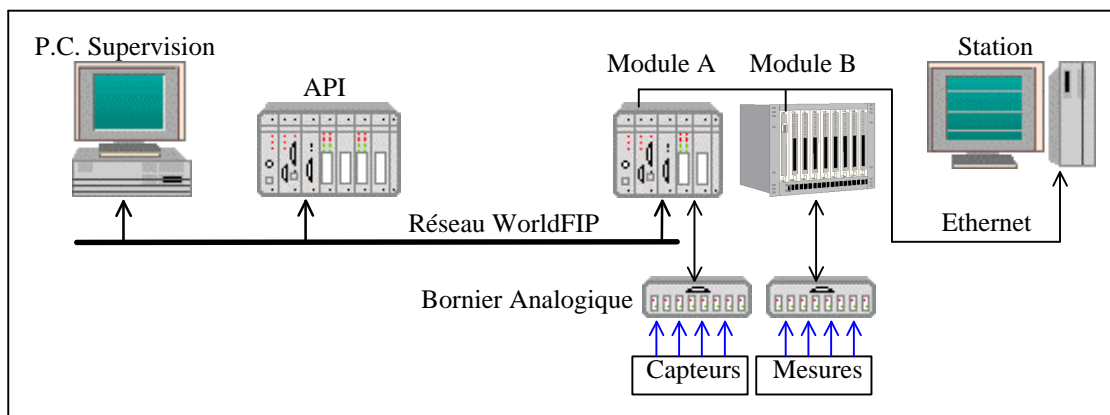


Figure 1-10 : Schéma de principe des futurs systèmes.

1.2.2.3. Test des 70 bobines.

Les mesures qui doivent être prises en charge par le système de contrôle commande sont indiquées en italique.

Les bobines seront toutes réceptionnées dans le hall 198 au CEA Saclay. Les tests de réception qui vont être réalisés pour le compte de la collaboration IPP CEA comprendront les opérations suivantes :

Réception des bobines.

a) Vérification visuelle.

- Identification de la bobine.
- Dommages dus aux transports (mécaniques, chocs ou usures).
- Conformité des capteurs de mesure avec les identifications constructeurs.
- Contrôle de l'intégrité de la bobine et vérification de la pression du gaz scellé dans les conduites et conducteurs.

b) Vérification électrique.

- Mesure de la résistance de la bobine avec un courant de 20 Ampères continu maximum, puis mesure des fils de prise de potentiel.
- Mesure des fils de raccordement des capteurs (résistance, continuité conducteur, isolation).
- Propriétés diélectriques à 10,4kV DC pendant 1 minute (bobine par rapport à la terre).

c) Vérification hydraulique.

- Circulation d'hélium gaz pour mesurer les pertes de charges dans les circuits de refroidissement de la bobine et de la boîte à bobine.

Test après installation de la bobine dans le cryostat.

a) Test électrique cryostat ouvert.

- Mesure des fils de raccordement des capteurs (résistance, continuité conducteur, isolation).
- Propriétés diélectriques :

Bobine non-plane à 10,4kV DC pendant 1 minute (bobine par rapport à la terre).

à 1,6kV AC 2kHz pendant 20ms.

Bobine plane à 7,2kV DC pendant 1 minute (bobine par rapport à la terre).

à 1,6kV AC 2kHz pendant 20ms.

b) Test de fuite hélium à la température ambiante.

- *Test d'étanchéité en pression d'hélium de la bobine à 30 bars.*

Mesure pendant la descente en froid et le réchauffage.

- *Pression du vide cryostat.*
- *Taux de fuite dans le vide cryostat.*
- *Température de la bobine et de la boîte à bobine.*
- *Effort et déformation de la boîte à bobine.*
- *Pression d'hélium de la bobine et de la boîte à bobine.*
- *Mesure de la résistance de la bobine avec un courant de 10A et détermination du RRR. (Rapport des Résistances Résiduelles) rapport de la résistance à chaud sur la résistance à froid, juste avant que la résistance ne transite.*
- *Débit dans chaque double couche de la bobine et dans la boîte à bobine.*

Test à basse température.

a) Test électrique.

- *Propriétés diélectriques :*

Bobine non-plane à 10,4kV DC pendant 1 minute (bobine par rapport à la terre).

à 1,6kV AC 2kHz pendant 20ms.

Bobine plane à 7,2kV DC pendant 1 minute (bobine par rapport à la terre).

à 1,6kV AC 2kHz pendant 20ms.

- *Stabilité de 30 minutes sur les instruments de températures.*

b) Test hydraulique.

- *Test de fuite dans le vide d'isolement avec une pression d'hélium dans chaque canal.*
- *Vérification de la perte de charge de chaque circuit d'hélium de la bobine.*
- *Vérification de la perte de charge de la boucle de refroidissement de la boîte à bobine.*

Test en courant.

- *Test de décharge de sécurité à 1kA.*
- *Courbe de montée du courant (Figure 1-11 page suivante).*
- *Test de quench pour la première bobine de chacun des 7 types.*
- *Test de déformation.*
- *Evaluation de la résistance de jonction des points de connexion de la bobine.*

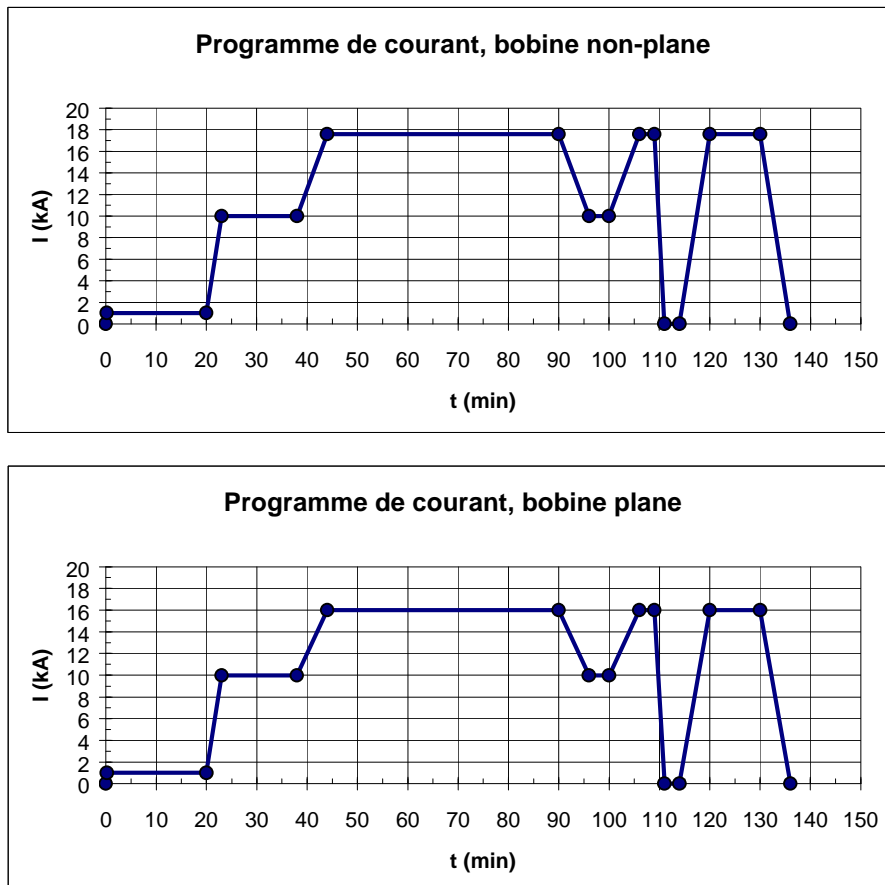


Figure 1-11 : Courbe de monté du courant.

Test après réchauffage avec la bobine en dehors du cryostat.

a) Test hydraulique.

- test d'étanchéité en pression d'hélium de la bobine à 30 bars.
- Vérification de la perte de charge de chaque circuit d'hélium de la bobine.
- Vérification de la perte de charge de la boucle de refroidissement de la boîte à bobine.

b) Test électrique.

- Propriétés diélectriques :

Bobine non-plane à 9,1kV DC pendant 1 minute (bobine par rapport à la terre).
à 1,4kV AC 2kHz pendant 20ms.

Bobine plane à 6,3kV DC pendant 1 minute (bobine par rapport à la terre).
à 1,4kV AC 2kHz pendant 20ms.

- Mesure de la résistance de la bobine avec un courant de 10 Ampères continu maximum, puis mesure des fils de prise de potentiel.

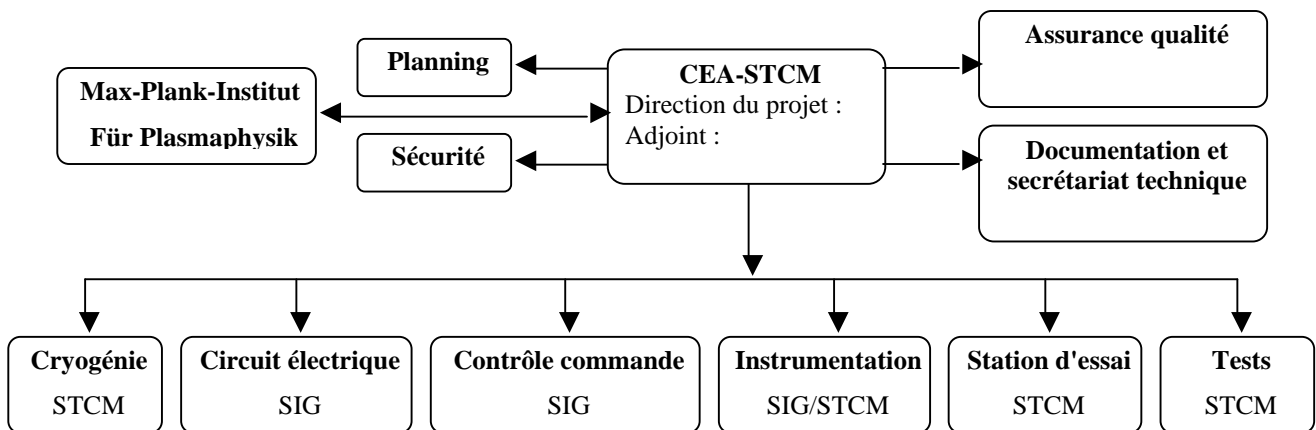
1.3. Organisation du projet.

1.3.1. Organigramme service.

Ce projet concerne deux services.

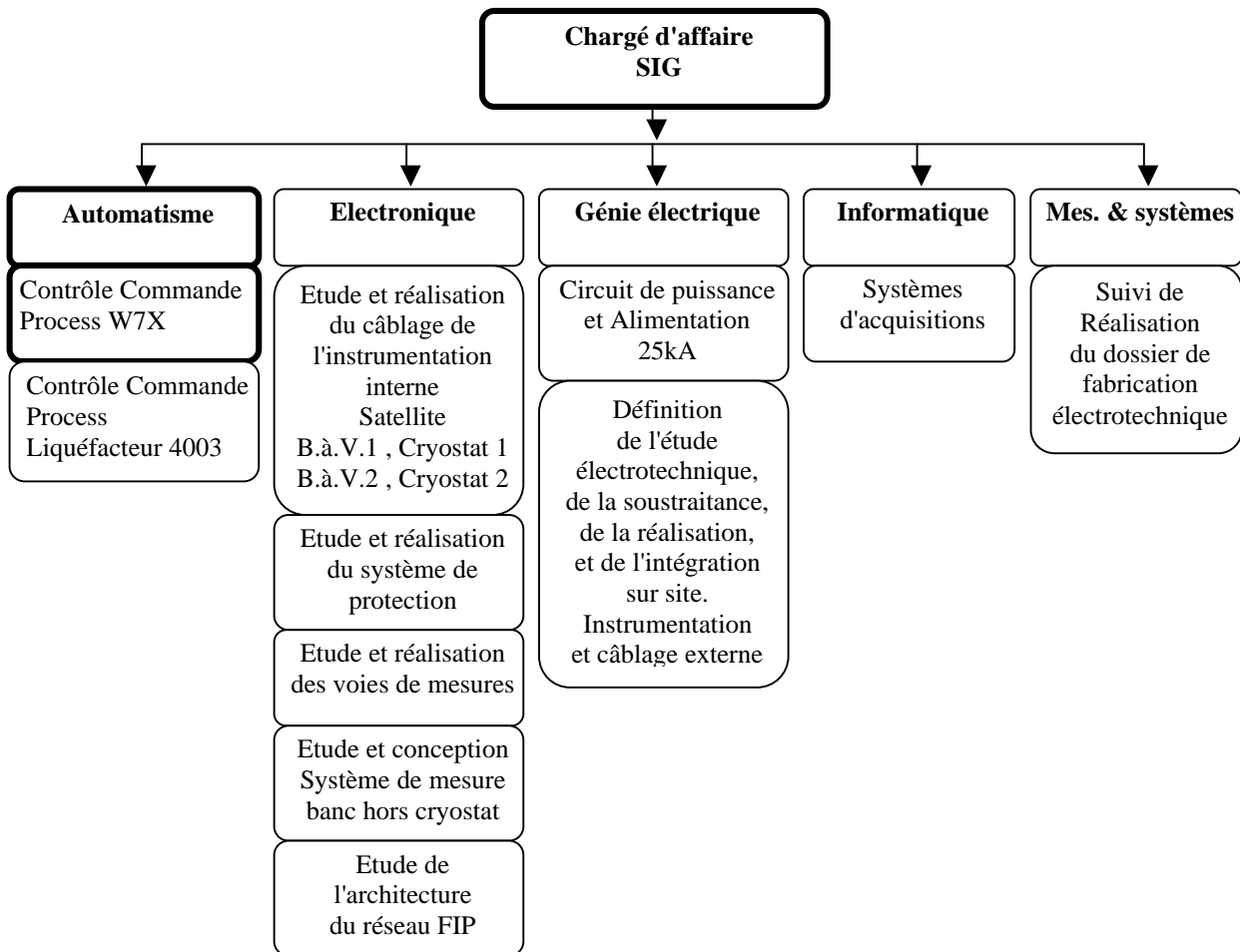
Le STCM (Service des Techniques de Cryogénie et de Magnétisme) est le service pilote du projet, et le SIG (Service d'Instrumentation Générale) qui est chargé de l'instrumentation de la station d'essai.

1.3.1.1. Organisation fonctionnelle de l'équipe projet pour les tests de qualification à Saclay.



1.3.1.2. Organisation structurelle au sein du SIG.

Cette organisation définie par le service, est pilotée par le chargé d'affaire.



Les rôles de chargé d'affaire et la responsabilité des automatismes m'ont été confiés dans le cadre de ce projet W7X.

1.3.2. Responsabilités du chargé d'affaire.

L'ensemble du travail a été réparti suivant les spécialités de chaque groupe. (Automatisme, Electronique, Génie électrique, Informatique, Mesure et systèmes).

La définition des ressources humaines a été faite par le chef de service.

J'ai assuré la fonction de chargé d'affaire du projet W7X pour mon service. Je me suis occupé du planning général, de la coordination des travaux internes de chacun, et des relations externes avec notre collaborateur le STCM. Pour cela, une réunion est prévue tous les quinze jours pour rendre compte du suivi de la réalisation, de l'état d'avancement du travail de chaque personne afin de résoudre les problèmes auxquels nous sommes confrontés. Des réunions thématiques ont été organisées pour traiter les points particuliers de l'installation. A l'issue de ces réunions, un compte rendu était rédigé, puis diffusé aux personnes concernées du projet.

J'ai pris en charge le suivi des commandes pour mon service ainsi que la gestion des commandes pour un montant inférieur à 100 kF.

1.3.3. Responsable d'automatisme.

Cette application se réalise en collaboration avec le responsable cryogénique.

Elle concerne : l'étude du processus cryogénique, la gestion de la nomenclature, une analyse fonctionnelle et la programmation grafcet du processus. Une définition de l'architecture de contrôle commande tient compte des composants et des échanges du réseau. Le poste de conduite est associé au contrôle commande de l'installation. J'ai participé à la spécification de l'implantation électrotechnique.

J'ai défini les phases principales du processus cryogénique en concertation avec le spécialiste. Une affectation des E/S (Entrées/Sorties) du système de contrôle commande est faite afin d'assurer ces phases. L'établissement des boucles de régulations pressenties qui composent l'installation sont mises en évidence. J'ai réalisé avec un outil de dessin (Autocad) la schématique cryogénique et j'ai tenu à jour les modifications des différentes versions de ces schémas. La dernière version est donnée en annexe 3.

J'ai eu en charge la gestion de la nomenclature, un exemple montre la structure de celle-ci en annexe 4. L'établissement des 26 champs dont les principaux sont les suivants : Nom de l'élément, désignation, fonction de l'élément, type et référence matériel, gamme et type de mesure, affectation des E/S, etc.....

1060 éléments constituent cette nomenclature. Elle est composée de 358 chaînes de capteurs / actionneurs. Une identification et une caractéristique de chaque composant est faite pour chaque voie de mesure. Une affectation et une distribution des E/S est pointée pour les systèmes d'acquisitions et pour l'API. La diffusion de la nomenclature servant de base d'étude pour les groupes électronique, informatique, automatisme et électrotechnique.

L'analyse fonctionnelle et la programmation grafcet du processus se traduisent par une spécification de la méthode d'analyse et de la programmation. J'ai contribué au suivi de réalisation de la programmation et j'ai effectué des développements des sous programmes spécifiques :

?? Mise au point d'un réseau FIP entre API C370 de W7X et API C370 du liquéfacteur.

?? Sous programme FIT pour les températures Cernox.

?? Sous programme de gestion du coupleur MODBUS Maître.

?? Configuration du réseau WorldFIP.

Une définition de l'architecture de contrôle commande est conçue avec les composants et les échanges du réseau. La configuration du réseau s'effectue par l'intermédiaire de l'atelier de programmation. Des fichiers contenant les instructions d'identification des variables sont créés afin de permettre l'intégration de produits tiers.

Le poste de conduite a pour rôle principal d'offrir une interface graphique homme/machine dans le cadre d'un système de contrôle commande. Une spécification de cette interface a été déterminée par la représentation et l'arborescence des vues.

La définition et une configuration des échanges du réseau ont été élaborées avec la base de données du poste de supervision.

La spécification de l'implantation des baies et armoires d'instrumentation a été accomplie en accord avec les personnes de l'électrotechnique. Des schémas d'implantation dans le hall sont montrés en annexe 5.

Chapitre 2

PROCESSUS CRYOGÉNIQUE ET MESURES

2. Processus cryogénique et mesures.

2.1. Introduction.

Ce chapitre est composé de trois parties. Il s'agit dans cette première partie de décrire les douze phases de processus cryogénique qui permettent de répondre aux objectifs fixés.

La seconde partie est consacrée à l'analyse des caractéristiques des chaînes de mesures. Un tableau récapitulatif des différents types de mesure permet de quantifier les besoins de chaque système d'acquisition. A chaque type de mesure est associé une étude particulière intégrant son raccordement et son conditionnement. Chaque chaîne sera décrite suivant une représentation graphique simplifiée.

La troisième partie, apportera des commentaires sur les spécifications d'exploitations.

2.2. Description du processus cryogénique.

2.2.1. Objectif.

Le processus cryogénique doit assurer le refroidissement et le maintien à basse température des bobines de W7X, afin d'effectuer leurs essais de montée en courant.

Le processus peut se résumer selon les 12 phases suivantes :

2.2.2. Les phases du processus.

Dans un premier temps il faut passer par l'initialisation ou l'attente des servitudes de tous les paramètres de l'application, et attendre la disponibilité des servitudes (Présence tension, air comprimé, pas de défaut système, etc..).

Une sélection du type de bobine est demandée, afin de choisir les paramètres de test (Température, Débit, Courant, Rampe de courant). Les raisons de ce choix reposent sur le fait que les circuits hydrauliques de la bobine plane sont différents de la bobine non-plane.

Une mise sous vide est effectuée par un pompage des enceintes à vide, avec un temps de pompage d'une semaine à cause de l'énorme volume des cryostats (Approximativement 130 m³). Des tests de fuites des différents circuits cryogéniques sont également exécutés par l'opérateur.

Un rinçage des circuits de refroidissement de la bobine et de la boîte à bobine est réalisé, afin d'enlever les molécules de gaz indésirables qui boucheraient les tuyaux à la première mise en froid. En effet, à la température de fonctionnement finale des bobines, l'air

ainsi que tous les gaz constituants de l'air deviennent solides. Il y a plusieurs cycles de rinçage qui s'effectuent par pompage des circuits, puis remplissage des conduites avec de l'hélium pur afin de ramener les taux de pollution en air au ppm¹.

Une tâche particulière de repli des 5 phases suivantes permet d'attendre, en cas de présence défaut ou d'attente opérateur. Cette étape nommée "attente en froid" autorise le retour à une mise en froid après validation de l'opérateur.

Une première descente en froid de 300 à 100 K de la station d'essai est activée. Cette descente s'effectue jusqu'à 100 K, avec une pente de refroidissement de 3 K/h, et avec un écart en température entre l'entrée et la sortie de la bobine de 40 K maximum. Cette contrainte est la conséquence des rétreints des matériaux qui constituent la bobine (3 mm/m entre 300 et 4 K). La bobine va donc "rétrécir" de 1 cm dans ses plus grandes dimensions.

Une deuxième phase de descente en froid de 100 à 4.5 K se poursuit, et lorsque la valeur finale de 4.5 K est atteinte, il y a activation de la régulation sur la température, afin de pouvoir effectuer les trois tests sur les bobines.

Les tests d'isolement des amenées de courant (ADI) des bobines par rapport à la terre sont effectués à froid avant de brancher l'alimentation 25 kA. On appelle amenée de courant, la liaison électrique entre l'enroulement supraconducteur et le circuit extérieur qui est à la température ambiante.

Les tests hydrauliques servent à mesurer la perte de charge dans les différentes couches du conducteur, afin de déduire les pertes calibrées à mettre en place, pour chacune des bobines de la machine future.

Les tests électriques peuvent démarrer après la stabilisation de la température.

Les tests d'isolement électriques, les tests hydrauliques et les tests électriques sont déjà détaillés au paragraphe 1.2.2.3. (Test des 70 bobines - voir la partie test à basse température).

Une fois les tests terminés, le réchauffage de la station d'essai jusqu'à 100 K, sans contrainte particulière, peut commencer. La remontée de 100 à 300 K se déroule ensuite suivant une rampe de température de 3 K/h, avec un écart en température entre l'entrée et la sortie de la bobine de 40 K maximum, pour le retour à la température ambiante.

La dernière phase arrête le pompage dans l'enceinte à vide et active la remise à la pression atmosphérique avec de l'azote (gaz neutre).

¹ ppm = part pour million.

2.3. Caractéristiques des chaînes de mesures.

2.3.1. Présentation de la chaîne de mesure.

La chaîne de mesure est l'ensemble des éléments nécessaires pour connaître la valeur ou l'évolution de paramètres d'un système physique.

Dans le cas des capteurs délivrant un signal électrique, une chaîne de mesure est constituée des éléments suivants :

Capteur ↗ Câble ↗ Interface ↗ Mesure

Le capteur est adapté à la mesure, en terme de sensibilité, plage d'utilisation, répétabilité, hystérésis, fidélité, dérive en température, pression et humidité pour les principaux.

Le câble est un maillon de la chaîne essentiel, car un câble mal adapté peut apporter beaucoup de perturbations dans les mesures. Les principales étant dues aux impédances parasites qui influent sur la valeur de mesure du capteur. Pour les signaux rapides, la bande passante doit être adaptée et le câble doit permettre la transmission de fréquences bien supérieures à celles constituant le signal ainsi que nous le suggère le théorème de SHANNON. La génération de bruit peut aussi troubler la mesure d'un très faible signal avec un câble non ou mal blindé. Il faut également éviter les effets de couplages, si on dispose de plusieurs capteurs sur un équipement reliés à une seule carte de mesure.

L'interface sert d'adaptateur d'impédance entre le capteur et l'étage amplificateur. Cet étage est destiné à amplifier les signaux du capteur. L'étage conditionneur linéarisateur est une option qui facilite l'exploitation. Il transmet un courant proportionnel à la valeur de la grandeur mesurée. On trouve aussi un composant d'isolation galvanique entre le capteur et l'élément de mesure, ainsi qu'éventuellement un filtrage destiné à supprimer les signaux parasites.

La mesure arrive sur les cartes des systèmes d'acquisitions qui, après un traitement numérique simple, affichent la valeur physique mesurée sur un écran.

2.3.2. Résumé du type et du nombre de mesures.

Les tableaux suivants fournissent le récapitulatif des différents types de mesure effectués sur l'installation avec le nombre de voies lues par les systèmes (API, système d'acquisition 1 et 2).

Fonction de la mesure	Contrôle Commande	Système d'acquisition	
	API	Lent 1	Lent 2
Analyseurs (AT)	2	0	0
Pression absolue (PT)	3	1	1
Pression différentielle (PDT)	2	2	2
Pression vide (PT)	2	0	0
Niveau d'hélium (LT)	1	0	0
Courant élément chauffant (TCI)	2	0	0
Température (TT)	5	5	5
Température par CABTF (TT)	6	0	0
Total	23	8	8

Tableau 2-1 : Mesures du satellite.

Fonction de la mesure	Contrôle Commande	Systèmes d'acquisitions 1 et 2	
	API	Lent	Rapide
Débit (FT)	6	0	0
Pression absolue (PT)	14	10	0
Pression différentielle (PDT)	32	32	0
Pression vide (PT)	2	2	0
Niveau d'hélium (LT)	2	0	0
Courant élément chauffant (TCI)	10	0	0
Température (TT)	12	32	0
Température régulateur (TC)	6	0	0
Température par CABTF (TT)	22	0	0
Total	106	76	0

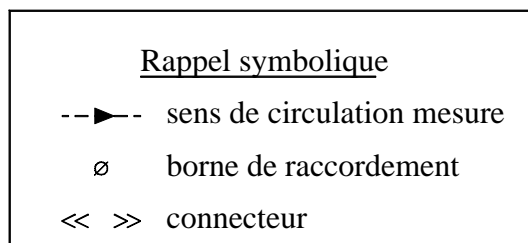
Tableau 2-2 : Mesures des deux boîtes à vannes.

Fonction de la mesure	Contrôle Commande	Systèmes d'acquisitions 1 et 2	
		API	Lent
Tension bobine (U)	0	20	20
Tension de transition, détection (DUP)	0	10	10
Tension amenée de courant (DAC)	0	4	4
Tension de ligne supra (DL)	0	4	4
Pression thermomètre à gaz (PT T)	4	4	0
Température (TT)	24	52	0
Extentiomètre, déplacement (ZT)	0	8	0
Contrainte (WT)	0	48	0
Courant bobine (I)	2	2	2
Courant alimentation (I)	2	2	2
Tension alimentation (U)	2	2	2
Tension résistance de masse (U)	2	2	2
Tension mesure RRR (U)	0	4	0
Température par CABTF (TT)	10	0	0
Total	46	162	46

Tableau 2-3 : Mesures des deux cryostats.

2.3.3. Représentation graphique simplifiée des différents types de voie de mesure.

Dans ce paragraphe je vais traiter les mesures de température, les autres représentations graphiques simplifiées des différents types de voie de mesure sont mis en annexe 7.



Mesure de la température par conditionneur.

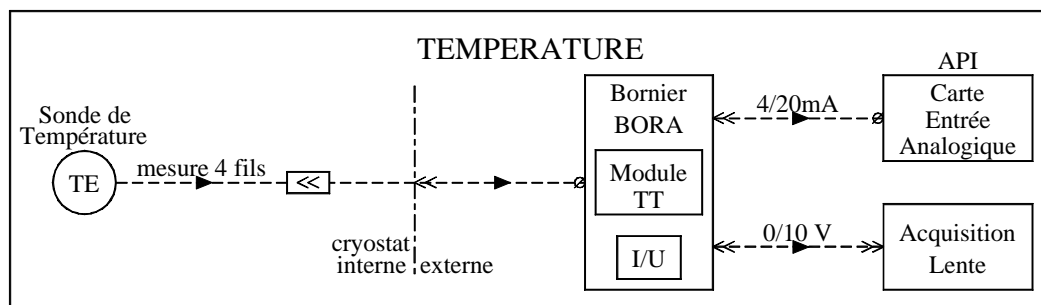


Figure 2-1 : Schéma de la voie de mesure de la température.

La sonde Cernox.

La sonde Cernox est utilisée à très basse température. La sonde de forme cylindrique ($\varnothing = 3 \text{ mm}$, $L = 11,5 \text{ mm}$) est livrée avec une fiche d'étalonnage qui contient les valeurs de résistance et de température correspondant aux points d'étalonnés. La courbe d'étalonnage est représentée par la figure 2-2.

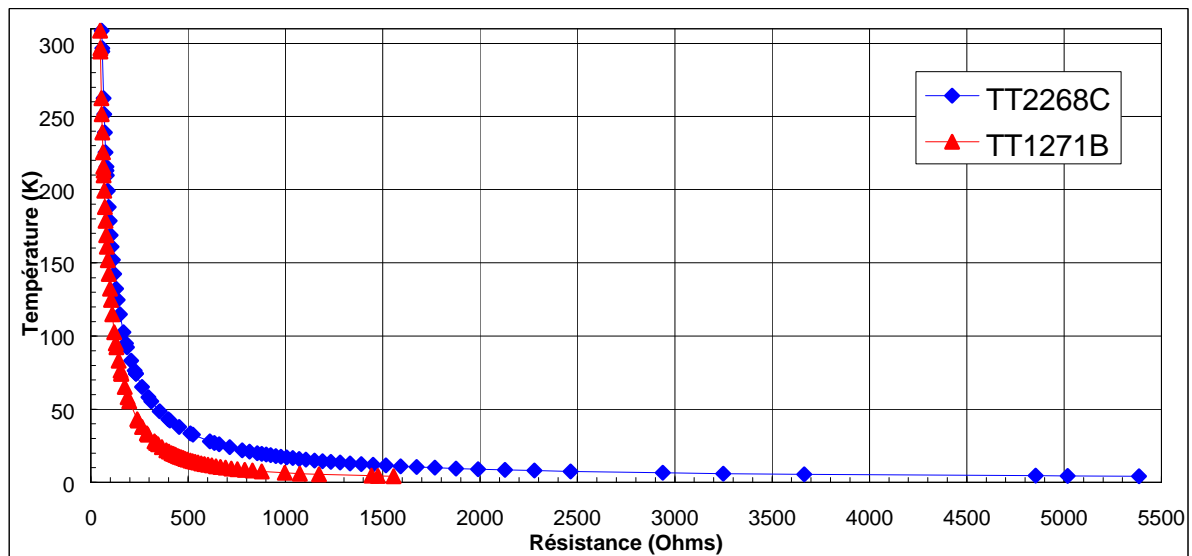


Figure 2-2 : Courbe d'étalonnage de sondes Cernox.

Sur le lot de 60 sondes fournies par le fabricant, les valeurs d'impédance min et max sont :

?? Valeur minimum de la sonde cernox 47,7 ohms à 300 K et 1550 ohms à 4,2 K.

?? Valeur maximum de la sonde cernox 57,1 ohms à 300 K et 5360 ohms à 4,2 K.

Sur la figure 2-2, on remarque une grande différence d'impédance à basse température. Nous avons dû adapter les conditionneurs de température en fonction de la résistance des sondes pour obtenir une meilleure sensibilité.

Le conditionneur.

Le signal de la sonde est mesuré grâce à un conditionneur linéarisateur. La résistance d'un capteur de température Cernox varie entre ~ 50 et $\sim 6000 \text{ } \Omega$ pour une variation de température comprise entre 308 K et 4,2 K. Ce module permet donc de retranscrire cette variation en boucle de courant pour l'API ($4 \text{ mA} \simeq 50 \text{ } \Omega = 308 \text{ K}$ et $20 \text{ mA} \simeq 6000 \text{ } \Omega = 4,2 \text{ K}$).

La mesure de la résistance du capteur est réalisée avec quatre fils. Deux fils servent à l'alimentation en courant, les deux autres sont utilisés pour la mesure de la tension aux bornes du capteur.

Un générateur de courant de 10 μA alimente en permanence le capteur. Grâce à la loi d'ohm, la tension aux bornes du capteur est ainsi proportionnelle à la variation de la résistance.

Un amplificateur associé à un convertisseur permettent la génération de la boucle de courant 4-20 mA. Deux réglages permettent de fixer les points bas et haut de la boucle de courant (point bas = 4 mA, point haut = 20 mA). Une boîte à résistances est utilisée pour simuler la sonde de température afin de régler le conditionneur. Le signal de sortie compris entre 4-20 mA est lu sur la carte d'entrée analogique 12 bits de l'automate.

Traitement des entrées analogiques de l'API.

Un traitement est effectué sur les entrées analogiques de l'API afin d'avoir les valeurs mesurées en grandeur physique. Le module d'entrée de courant analogique fournit 16 voies d'entrée, chacune étant capable de convertir un signal analogique en signal numérique utilisable en fonction des besoins de l'application. La plage de courant choisie en standard pour nos installations est de 4 à 20 mA. La carte fournit, par le réseau FIP, des données utilisateur mises à l'échelle de façon que 4 mA corresponde à un comptage de 0 pts et que 20 mA corresponde à un comptage de 32000 pts. La mise à l'échelle de l'entrée est présentée dans la figure 2-3.

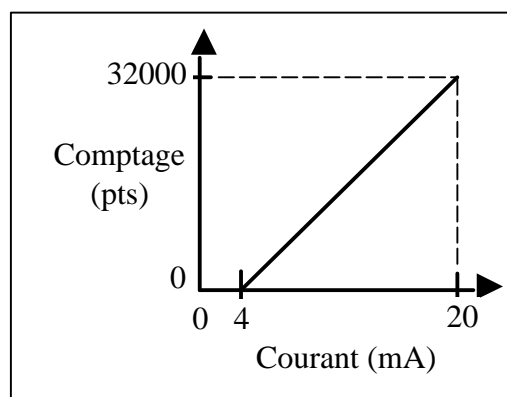


Figure 2-3 : Mise à l'échelle du module d'entrée de courant analogique.

Après la mise à l'échelle du module, une fonction $y = a.x + b$ est calculée dans l'API.

Le calcul de la valeur de la résistance permet d'assimiler la courbe figure 2-4, à une droite linéaire d'équation $y = a.x+b$ entre les bornes 4-20 mA.

Pour TT2268C $\approx y = 0,165715625 \cdot x + 57,1$

Pour TT1271B $\approx y = 0,046946875 \cdot x + 47,7$

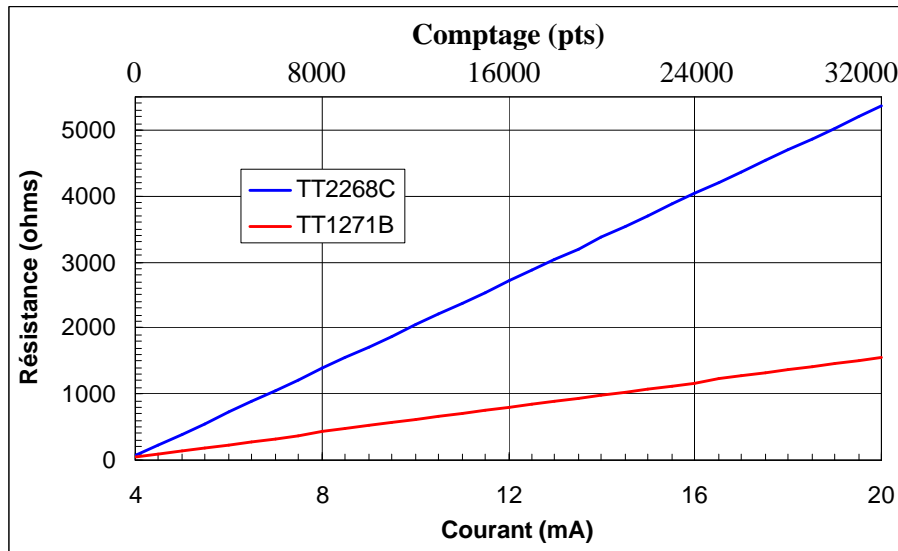


Figure 2-4 : Mise à l'échelle sondes Cernox par $R = f(I)$.

Pour déterminer la température en fonction de la résistance, on procède de la façon suivante : à partir des points d'étalonnage, on trace la fonction $1/T = f(\ln(R))$ et on extrapole la courbe à deux polynômes d'ordre 4.

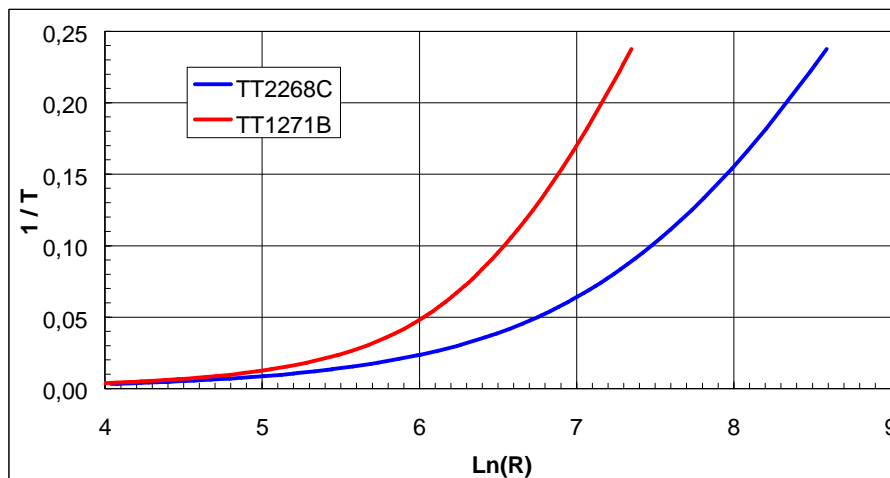


Figure 2-5 : Courbe sondes Cernox $1/T = f(\ln(R))$.

Calcul de la température TT2268C avec T = 308.6 à 32.6 K.

$$T = 1 / (a_0 \cdot \text{Ln}(R)^4 + a_1 \cdot \text{Ln}(R)^3 + a_2 \cdot \text{Ln}(R)^2 + a_3 \cdot \text{Ln}(R) + a_4)$$

$$a_0 = 4.0720e-4 \quad a_1 = -6.5238e-3 \quad a_2 = 4.1062e-2 \quad a_3 = -1.1636e-1 \quad a_4 = 1.2487e-1$$

Changement de courbe à (525 ohms \approx 32 K) avec T = 32.6 à 4 K.

$$T = 1 / (b_0 \cdot \text{Ln}(R)^4 + b_1 \cdot \text{Ln}(R)^3 + b_2 \cdot \text{Ln}(R)^2 + b_3 \cdot \text{Ln}(R) + b_4)$$

$$b_0 = -1.1785e-3 \quad b_1 = 3.6598e-2 \quad b_2 = -3.9537e-1 \quad b_3 = 1.8344 \quad b_4 = -3.1278$$

La ligne d'appel du sous programme FIT avec les arguments d'appels associés, utilisée dans l'API est la suivante :

FIT(TT2268C, 4.0720E-4, -6.5238E-3, 4.1062E-2, -1.1636E-1, 1.2487E-1,
5.25E+2, -1.1785E-3, 3.6598E-2, -3.9537E-1, 1.8344E+0, -3.1278E+0, TT2268C)

(Le programme est donné en annexe 13).

Calcul de la température TT1271B avec 308.6 à 32.6 K.

$$T = 1 / (a_0 \cdot \text{Ln}(R)^4 + a_1 \cdot \text{Ln}(R)^3 + a_2 \cdot \text{Ln}(R)^2 + a_3 \cdot \text{Ln}(R) + a_4)$$

$$a_0 = 1.6077e-3 \quad a_1 = -2.6248e-2 \quad a_2 = 1.6387e-1 \quad a_3 = -4.5820e-1 \quad a_4 = 4.8302e-1$$

Changement de courbe à (292 ohms \approx 32 K) avec T = 32.6 à 4 K.

$$T = 1 / (b_0 \cdot \text{Ln}(R)^4 + b_1 \cdot \text{Ln}(R)^3 + b_2 \cdot \text{Ln}(R)^2 + b_3 \cdot \text{Ln}(R) + b_4)$$

$$b_0 = -4.0007e-3 \quad b_1 = 1.0535e-1 \quad b_2 = -9.8381e-1 \quad b_3 = 3.9526 \quad b_4 = -5.8215$$

La ligne d'appel du sous programme FIT avec les arguments d'appels associés, utilisée dans l'API est la suivante :

FIT(TT1271B, 1.6077E-3, -2.6248E-2, 1.6387E-1, -4.5820E-1, 4.8302E-1,
2.92E+2, -4.0007E-3, 1.0535E-1, -9.8381E-1, 3.9526E+0, -5.8215E+0, TT1271B)

Pour la mesure du système VME d'acquisition, un module I/U est utilisé afin de convertir et d'isoler le signal 4-20 mA en un signal 0-10 V. Le signal de sortie du module 0-10 V est lu par la carte d'entrée analogique 14 bits du système d'acquisition. Ensuite, la valeur de la température est restituée par dichotomie dans une table contenant R et T.

La sonde Platine.

La sonde Platine est utilisée pour les températures allant de la température ambiante à 40 K. Les valeurs de résistance d'un capteur platine varient entre 0 et 110 Ω pour une température de 30 à 298 K. Pour ce type de sonde, l'étalonnage n'est pas nécessaire.

Le générateur de courant de sonde est égal à 1 mA. La boucle de courant est donc égale à 4 mA pour 30 K ou 0 Ω et 20 mA pour 298 K ou 110 Ω .

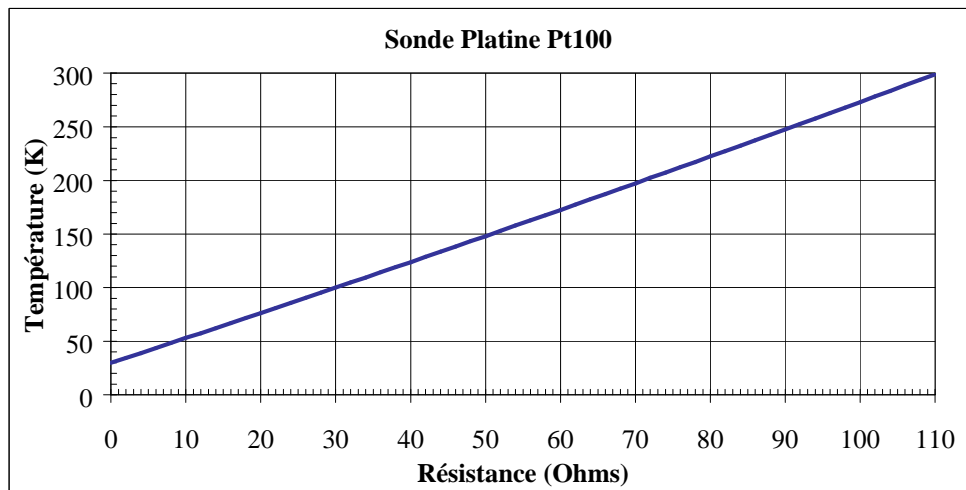


Figure 2-6 : Courbe d'une sonde Platine $T = f(R)$.

La mise à l'échelle du module platine est calculée avec une fonction $y = a.x + b$ dans l'API. Le calcul de la valeur de la température permet d'assimiler la courbe figure 2-7, à une droite linéaire d'équation $y = a.x + b$ entre les bornes 4-20 mA.

Pour la température platine $y = 0,008406875 \cdot x + 29,93$

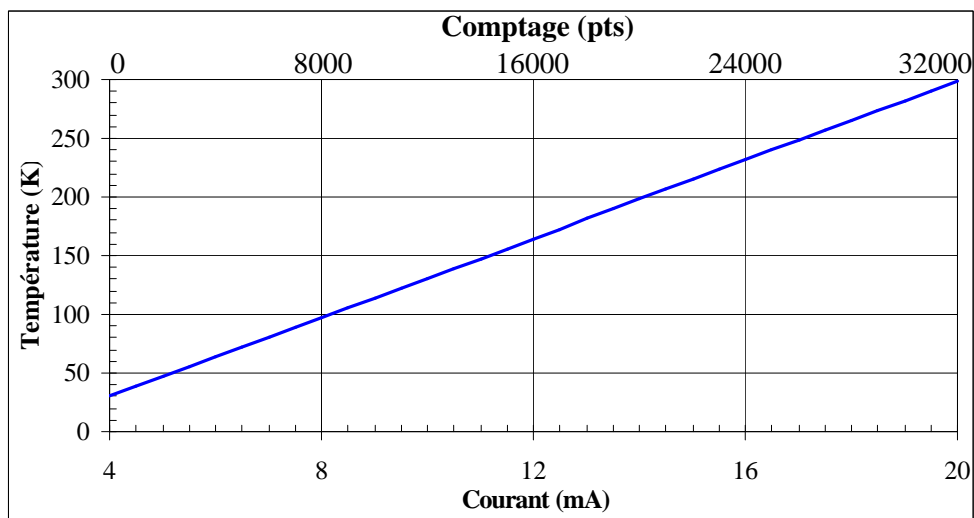


Figure 2-7 : Mise à l'échelle d'une sonde Platine par $R = f(I)$.

2.4. Spécifications d'exploitation.

Pour assurer la mise au point du processus cryogénique sur nos installations prototypes, il est nécessaire de fournir un certain nombre de fonctionnalités particulières :

- ?? Une reprise manuelle des actionneurs sans verrouillage du processus. *Dans la programmation grafcet, les actions sont faites uniquement sur front de montée d'activité d'étapes. Ainsi, il est possible d'agir en manuel sur une variable par le poste de conduite, afin de corriger des erreurs d'analyses de processus que l'on rencontre inévitablement sur des installations prototypes.*
- ?? Le forçage des E/S. *Il est utilisé dans le cas où un capteur ou un actionneur serait défectueux, ou sur une erreur liée au programme grafcet. Cela permet le remplacement ou le dépannage de celui-ci sans arrêter le processus.*
- ?? La visualisation en temps réel des d'étapes actives des grafkets. *Elle est animée sur des pages graphiques du poste de conduite. Il est en effet nécessaire de visualiser les différentes phases du processus, pour en assurer la mise au point.*
- ?? Les modifications des seuils et des différents paramètres de régulation de l'installation. *Ils sont accessibles à partir des vues synoptiques. Cette fonctionnalité est utilisée pour le réglage des P.I.D. et des seuils de tests qui valident les transitions du graphe. Ceci améliore la souplesse lors de la mise au point du programme contenu dans l'API.*
- ?? Un historique de tous les paramètres du processus sur une semaine. *Un archivage global des données est effectué par le poste de supervision. Dans le cas des mesures et le réglage des boucles P.I.D., on utilise l'affichage par courbe de tendance. De cette façon, on peut suivre l'évolution de l'installation. Lorsqu'une panne survient, nous pouvons dérouler à nouveau le grafcet pour analyser un dysfonctionnement du processus grâce à l'archivage. La réalisation de ces fonctionnalités implique de nombreuses contraintes de programmation, mais assure ensuite un confort d'exploitation et de mise au point rapide justifiant le temps investi, qui est finalement rapidement amorti.*

Le volume des données et des paramètres traité par l'application est donc relativement important au regard du nombre d'E/S. Il y a beaucoup de valeurs analogiques et quelques valeurs logiques E/S. Ce volume est quantifié dans le tableau 2-4 des variables logiques et le tableau 2-5 des variables analogiques. Dans le tableau le mot "Image" représente la variable reflétant l'entrée ou la sortie dans la mémoire interne de l'API.

Variables (Bits)	Image	Forçage	Valeur
Entrées logique	64	64	64
Sorties logique	48	48	48
Sorties FESTO	52	52	52
Total	164	164	164
			492

Tableau 2-4 : Volume des variables logiques.

Variables	Image	Forçage	Valeur
	Réel (32bits)	bits	Entier (16bits)
Entrées analogique	224	224	
Entrées CABTF	40	40	
Sorties analogique	64	64	64
Total	328	328	64

Tableau 2-5 : Volume des variables analogiques.

Le volume de variables correspondant à la partie séquentielle de l'application est déterminé par l'utilisation de 39 grafquets, qui ont été nécessaires pour gérer toute l'installation. Une quantité de 302 bits d'étapes est multipliée par 2 pour la programmation des actions faites sur front de montée d'activité d'étapes. Pour chaque étape, il faut ajouter un mot d'écoulement du temps d'étape. Ce mot est exploité lors d'un franchissement de transition. Le nombre de bits utilisés pour le calcul des transitions est de 579.

Sur l'installation W7X, nous avons mis en œuvre deux postes de supervision. Par poste, nous animons un total de 2060 variables toutes confondues, dont 510 variables analogiques et 1550 variables logiques qui sont toutes accessibles en écriture. Une centaine d'images ont été réalisées afin de permettre un confort d'exploitation pour l'opérateur. (voir figure 2-8 page suivante)

La figure 2-8 illustre l'échange des données qui est fait à travers le réseau WorldFIP entre l'API et les postes de supervision.

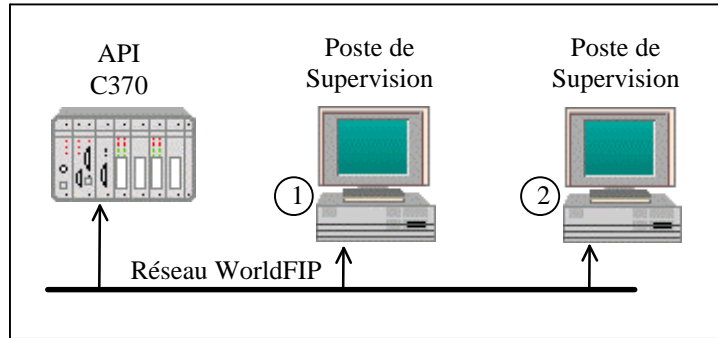
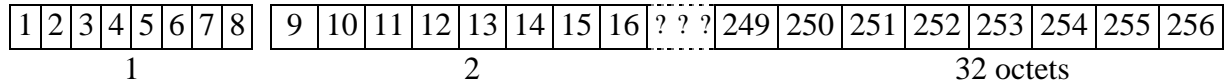


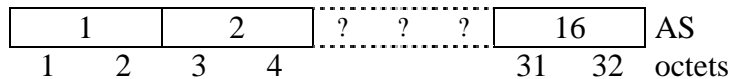
Figure 2-8 : Schéma de l'échange avec les postes de supervisions.

Nous avons décidé que l'API effectue la diffusion des variables de supervision. Ces variables sont donc identiquement transmises à tous les postes. L'échange des données se traduit par une émission périodique de variables FIP de longueur fixe. On les appellent des trames, et elles ont trois formats différents.

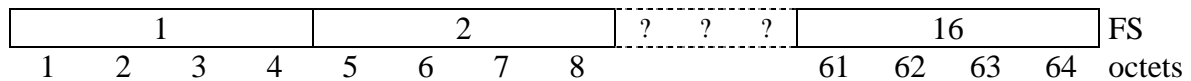
A) Pour envoyer des informations logiques type "TS" (Tout ou rien de Sortie), la trame de longueur 32 octets, est composée de 256 booléens.



B) Pour envoyer des informations entières type "AS" (Analogique de Sortie), la trame de longueur 32 octets, est composée de 16 mots.



C) Pour envoyer des informations Flottantes type "FS" (Flottant de Sortie), la trame de longueur 64 octets, est composée de 16 flottants de 32 mots.



Nous avons regroupé par paquet les données échangées sur le réseau afin d'optimiser les performances de transfert entre l'API et la supervision. En fonctions des codages de trames, on peut calculer l'efficacité de FIP. En effet, toute transaction FIP est composée de l'échange de deux trames : une trame question ID_DAT suivie d'une trame réponse RP_DAT.

La trame RP_DAT doit intervenir dans un délai borné : ce temps s'appelle le temps de retournement TR. Le temps de retournement est le temps qui sépare la fin de réception d'une trame du début de l'émission de la trame suivante.

Exemple de calcul d'efficacité pour un TR de 10 μ s et 70 μ s à 1 Mb/s [9].

Calculs avec TR = 10 μ s.

longueur info utile	efficacité	débit utile à 1 Mb/s
n = 32	64.32 %	643.22 kb/s
n = 64	78.29 %	782.87 kb/s

Calculs avec TR = 70 μ s.

longueur info utile	efficacité	débit utile à 1 Mb/s
n = 32	49.42 %	494.21 kb/s
n = 64	66.15 %	661.50 kb/s

La diffusion de l'ensemble des données de supervision est donc assurée par l'envoi de trames avec une périodicité de 150 ms pour les défauts et les données rapides, et l'émission de trames de période 300 ms pour les variables lentes.

Les données dites "rapides" :

?? L'émission de ces données à la période du cycle de traitement de l'automate permet de suivre, si nécessaire, chaque changement d'état des variables programmes, au niveau du poste de supervision.

Les données dites "lentes" :

?? Elles correspondent aux paramètres de réglage de l'installation. Elles ne nécessitent pas un suivi "temps réel". Leur transmission à 300 ms permet d'avoir un macro-cycle d'arbitre de bus limité en taille, tout en laissant une bande passante sur le réseau suffisamment large pour tout le trafic aperiodique.

Le tableau ci-dessous donne le nombre de trames rapides et lentes, en fonction du type de données qu'elles véhiculent.

Format des trames	Trames rapides (150ms)			Trames lentes (300ms)		
	TS	AS	FS	TS	AS	FS
Trames commune aux deux postes	6	0	5	4	2	3
Trames poste C1	0		9	0	5	12
Trames poste C2	0		9	0	5	12
Total	6		23	4	12	27

Tableau 2-6 : Quantités de trames pour la supervision.

Total de toutes les trames pour la supervision.

Trame au format (TS) = 10 x 16 mots \approx 160 mots \approx 320 octets

Trame au format (AS) = 12 x 16 mots \approx 192 mots \approx 384 octets

Trame au format (FS) = 50 x 32 mots \approx 1600 mots \approx 3200 octets

72 trames circulent sur le réseau \approx 3904 octets

Le poste de supervision est capable de déclencher une acquisition globale des données sur un trigger programmé associé au changement d'état pour des variables logiques prédéfinies.

Nous avons une maîtrise totale de la charge du réseau (bande passante), qui a été ajusté pour ne jamais atteindre de saturation du réseau.

Si nous voulions ajouter un poste de supervision ; il est simplement nécessaire d'ajouter deux variables périodiques FIP, pour assurer l'écriture en mémoire de l'API.

Cette variable d'écriture est véhiculée à travers le protocole pseudo MODBUS implanté dans notre système. Ce dialogue nous rend indépendant du protocole propriétaire, du fabricant d'automate. Par contre, il nous oblige à implanter notre algorithme dans les gammes d'automate que nous utilisons.

Le poste de supervision peut également assurer le téléchargement d'un fichier binaire de 64 k octets maximum. Il est aussi possible de transférer une base de données pour notre algorithme flou. Cette fonctionnalité assure rapidement le téléchargement d'un grand nombre de paramètres dans l'automate par exemple (7 k octets pour la configuration d'une régulation floue de 8 entrées, 4 sorties, et 128 règles). Le temps de transfert des données floues à travers le réseau WorldFIP est de 42 secondes pour les 7 k octets, ce qui détermine un temps de transfert de l'ordre 167 octet/s. Pour le fichier binaire complet de 64 k octets le temps de chargement est de 383 secondes (6 minutes 38).

L'automate C370 autorise le chargement du programme en ligne sans arrêter le processus. Cette solution est rendue possible par le changement de zone programme. C'est un avantage, car la séquence de mise en froid étant très longue, il y a une incompatibilité à recommencer l'opération préalable.

Chapitre 3

CONTROLE COMMANDE

3. Contrôle commande.

3.1. Introduction.

Le troisième chapitre se compose de quatre parties. La première traitera des activités de développement orientées vers deux pôles : le contrôle commande sur réseau de terrain WorldFIP et la Logique Floue.

J'argumenterai ensuite le choix de l'automate retenu, pour assurer les traitements principaux de ce système de contrôle commande.

Dans la deuxième partie, l'architecture de réseau de terrain sera présentée avec les justificatifs et la description des sous-ensembles qui composent l'installation W7X.

Je montrerai l'intérêt d'utilisation de produits interfacés avec le réseau WorldFIP. Les produits sont les suivants :

- ?? La CABTF (Centrale d'Acquisition Basse Température Fipée),
- ?? Le FESTO (Terminal de distributeurs pneumatique),
- ?? L'Automate CE8035 déporté,
- ?? Le tiroir de mesure de Niveau d'Hélium.

Je traiterai de l'étude de deux interfaces particulières : la communication et de l'échange de données à travers un coupleur et une passerelle. (Le coupleur assure la gestion d'une liaison FIP/MODBUS, la passerelle FIP/HART effectue le dialogue avec des capteurs intelligents).

La quatrième partie abordera enfin l'utilisation récente de la technologie Internet pour le poste de supervision.

3.2. Contexte.

Les activités de développement sur lesquelles nous travaillons plus spécifiquement dans mon groupe de travail sont orientées vers deux pôles :

1) Contrôle commande sur réseau de terrain WorldFIP :

?? Développement du poste de conduite ANIBUS sur PC adapté au besoin de supervision sur INTERNET, compte tenu du fait que ce groupe est chargé de la maintenance, et du support de ces installations implantées à travers le monde de la physique.

?? Spécification pour le développement d'une instrumentation interfacée avec le réseau de terrain WorldFIP.

?? Intégration de produits tiers industriels dans les architectures de contrôle commande.

?? Développement de passerelles pour l'échange des données.

2) Logique Floue :

?? Régulation et asservissement par Logique Floue du processus.

Intégration d'algorithme Logique Flou dans les automates industriels et développement d'interfaces utilisateur sur PC pour la configuration "floue".

Cette approche très pratique est utilisée lorsqu'une régulation multi-variable s'impose en permettant d'obtenir rapidement des résultats satisfaisants sans avoir à réaliser de modélisation et de traitement complexe sur des processus cryogéniques mal connus.

Ces objectifs de développement sont couplés avec une volonté d'en assurer des retombées industrielles grâce à des transferts technologiques vers des sociétés partenaires.

Choix stratégiques et description des fonctionnalités des automatismes.

L'historique des automates et le choix de la gamme d'automate CEGELEC ALSTOM C370, CE8035 sont décrits en annexe 1.

Le choix de l'automate peut s'établir en amont de l'analyse fonctionnelle grâce aux fonctionnalités qu'apporte le réseau de terrain WorldFIP.

En effet, si l'analyse fonctionnelle venait à mettre en évidence une insuffisance de capacité de traitement dans un seul automate, ce traitement pourrait être facilement réparti sur plusieurs automates. La vitesse, la capacité d'échanges de données associés au déterminisme du protocole WorldFIP, nous permettent de faire évoluer sans difficultés les capacités de traitement de nos applications.

Le déterminisme de WorldFIP est assuré par la transmission périodique de données rangées automatiquement en mémoire et synchronisées temporellement grâce aux mécanisme de diffusion du protocole (un producteur et n consommateurs simultanés).

Le contrôle commande de l'installation des essais des bobines supraconductrices W7X sera assuré par un automate programmable industriel C370 de chez ALSTOM.

L'automate programmable industriel est constitué principalement :

- ?? de modules de base, réalisant les fonctions de traitement, de mémorisation et de couplage avec les éléments de programmation,
- ?? de modules d'alimentation,
- ?? de modules périphériques ou interface :
 - E/S logiques,
 - E/S analogiques de type 0-10 V, 0-20 mA ou 4-20 mA,
 - régulateurs type PID,
 - liaisons séries asynchrones et coupleurs réseaux (MODBUS, FIP).

La conception modulaire de l'automate offre une grande souplesse d'adaptation à l'architecture d'un système de contrôle commande et au niveau d'automatisation requis. Elle permet de s'adapter à la géographie de l'installation. Les blocs d'entrées/sorties sont implantés au plus près du procédé, et sont pilotés par l'unité de traitement de l'automate qui est décentralisée dans une salle de commande informatisée.

Grâce à ce concept, on imagine facilement la possibilité de faire évoluer le système dans le temps, ou d'assurer la pérennité qui revient souvent à adapter, voir changer, l'unité principale de traitement. Cette architecture ne remet pas en cause le choix des interfaces d'entrées et de sorties qui restent souvent les mêmes.

Le programme de l'application est constitué d'un élément de commande. Cet élément est destiné à commander un constituant de la partie opérative du procédé.

Il est composé d'une part des données d'E/S, d'autre part d'un algorithme qui exploite ou pilote les données.

Le langage de programmation est littéral.

Les différents types de formats de la mémoire de l'automate programmable sont :

- ?? bits,
- ?? octets,
- ?? mots (signé ou non signé),
- ?? doubles mots (signé ou non signé),
- ?? tableaux de bits, d'octets, de mots,
- ?? réels.

Les différents types de traitement effectués par l'unité de traitement de l'automate sont :

- ?? traitements de bits,
- ?? traitements de mots et de valeurs,
- ?? grandeurs arithmétiques flottantes,
- ?? arithmétique calcul dans l'U.C. (Unité Centrale) de l'automate,
- ?? dialogue écran-clavier et sur réseaux,
- ?? grafacet,
- ?? mise en œuvre d'un moniteur temps réel,
- ?? Capacité mémoire et traitement temps de cycle de l'automate programmable industriel de 50 ms,
- ?? Volume grafacet de l'application.

Le standard de communication WorldFIP que nous avons retenu nous permet d'intégrer des produits tiers industriels tels que les îlots pneumatiques (exemple : produit industriel festo), des centrales d'acquisition basses températures fipées (société MII sous licence CEA). C'est un réseau de terrain avec un grand débit, et une diffusion de la base de données qui est destinée à tous les abonnés.

Une communication inter-machines s'opère avec plusieurs postes de commande. Les échanges entre l'API et les postes de supervision se trouvent simplifiés.

Grâce aux réseaux, une simplification du câblage traditionnel fil à fil entre les capteurs et les unités de traitement est constatée.

Le réseau de terrain FIP est géré par un arbitre de bus. La gestion du réseau spécifie la redondance d'arbitre de bus. Sur un réseau FIP, il peut y avoir un ou plusieurs arbitres de bus. Un seul arbitre est actif à un instant donné, les autres étant en veille. Ils surveillent l'activité de l'arbitre de bus actif. Si celui-ci tombe, un mécanisme local embarqué dans tout arbitre de bus potentiel permettra la ré-élection d'un arbitre remplaçant.

Les mécanismes du réseau FIP reposent sur le principe de diffusion des informations[9].

Tout échange est basé sur la diffusion par l'arbitre de bus d'une trame question ID_DAT, contenant le nom d'un identifieur. Cette question est simultanément enregistrée par toutes les stations connectées sur le bus. Une et une seule, se reconnaît comme productrice de l'identifieur. Une ou plusieurs autres se reconnaissent consommatrices de cette variable.

Le producteur de la variable diffuse ensuite la valeur relative à l'identifieur à l'intérieur d'une trame de réponse RP_DAT. Cette réponse est simultanément captée par les stations consommatrices.

Tous les mécanismes du réseau FIP utilisent ce type d'échange, éliminant ainsi tout problème de collision.

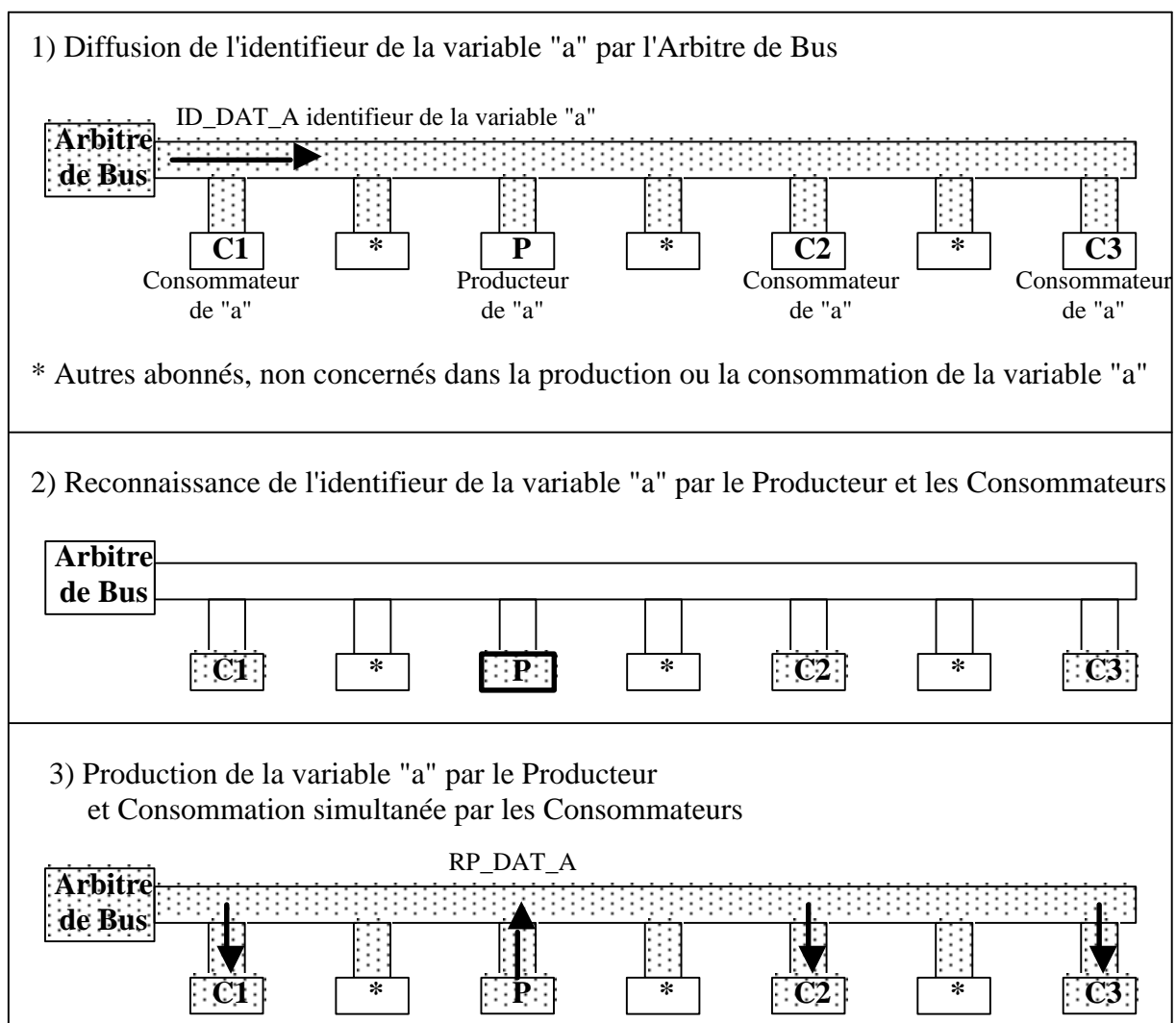


Figure 3-1 : Principe de diffusion des informations du réseau WorldFIP.

Le format d'une trame question ID_DAT indentifieur est représenté ci-dessous :

DTR	Contrôle	Identifieur	FCS	FTR	
14 bits	1 octet	2 octets	2 octets	7 bits	= 61 bits

DTR : Début de trame.

FCS : Frame Chekc Sequence (séquence de contrôle de trame).

FTR : Fin de trame.

Le format d'une trame de réponse RP_DAT est représenté ci-dessous :

DTR	Contrôle	PDU	Lg	Data	Status	FCS	FTR
14 bits	1 octet	1 octet	1 octet	n octets (n <= 125)	1 octet	2 octets	7 bits

PDU : Type de donnée (Utilisateur = 40H) ou (Système 50H,51H,52H).

Lg : Longueur des données.

Data : 125 octets de données utiles.

Status : Etat de rafraîchissement.

La charge du réseau se calcule en fonction de la vitesse d'émission et de la table de scrutation de l'arbitre de bus.

Un calcul estimatif de la charge du réseau réalisé ci-dessous permet de connaître la capacité de trafic restante sur le réseau. La transmission de 237 trames question ID_DAT constitué par des trames de 61 bits, correspond à un transfert de 14457 bits. Le calcul du nombre de bits pour les trames de réponse comprenant les bits services et les bits d'information utiles est de 97441 bits. Ce qui fait un total de 111898 bits. Le temps de retournement étant de l'ordre de 40 ?s, les temps de silence sont représentés par le calcul :
 $237 \times 40 \times 2 = 18960 \text{ ?s}$.

ID_DAT	TR	RP_DAT	TR
--------	----	--------	----

Dans l'application W7X la vitesse du réseau est à 1 Mbits/s, avec un Macro-Cycle de 300 ms. On dispose donc de 300 kbits théoriques pour 300 ms.

Comme le trafic du réseau est de 111898 bits à 1 Mbits/s, l'échange total s'effectue en $111898 \text{ ?s} + 18960 \text{ ?s} = 130858 \text{ ?s}$. Il nous reste 50% de disponible sur les 300ms du Macro-Cycle.

Cela correspond au résultat donné par l'atelier de programmation de l'arbitre de bus, qui pour un Macro-Cycle de 300 ms donne 45 % de messagerie aperiodique et 6 % de variables aperiodiques de libre.

3.3. Architecture proposée sur W7X.

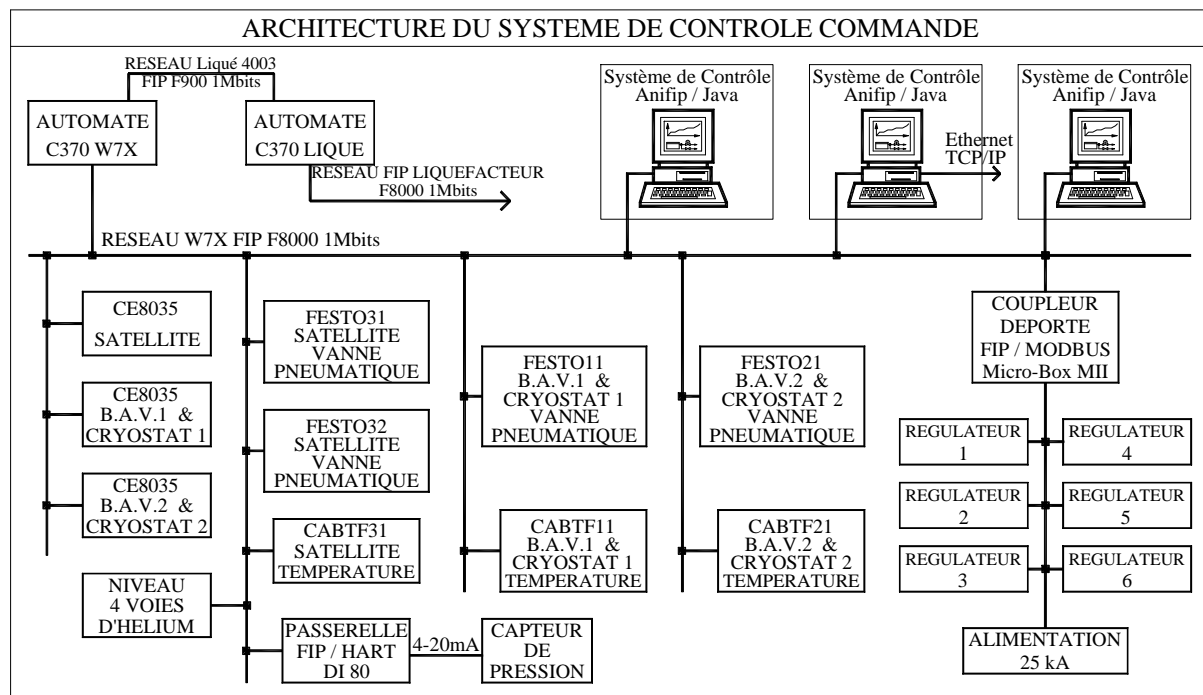


Figure 3-2 : Architecture du réseau WorldFIP.

3.4. Justificatifs.

L'installation W7X est conçue autour du réseau WorldFIP [10] figure 3-2 ci-dessus. Les différents appareillages sont regroupés par sous-ensembles suivants leurs fonctionnalités et suivant la gestion des fluides dans les cryostats. Les appareils raccordés au réseau WorldFIP sont décrits ci-après.

3.4.1. Description des sous-ensembles.

Sous-ensemble baies automate.

Nous trouvons l'automate principal C370 qui a pour rôle d'arbitre de bus du réseau FIP. Il contient tout le code de programmation de l'application et assure toutes les fonctions vitales de l'installation. Dans ces baies, nous avons trois châssis d'E/S déporté (CE8035) pour la gestion du satellite, de la boîte à vanne 1 cryostat 1, et de la boîte à vanne 2 cryostat 2.

Nous avons aussi la possibilité de mettre sur le réseau les postes de supervisions sur les points de connexion libre. Il est prévu d'installer deux postes en salle de commande et un poste sur la plate-forme au plus près de l'installation pour le démarrage, ou le dépannage de celle-ci.

Sous-ensemble armoire d'instrumentation satellite.

Dans cette armoire sont regroupés les îlots pneumatique festo31 et festo32 qui servent au pilotage des vannes pneumatiques du satellite, un boîtier CABTF31 de mesure de température, et un tiroir qui effectue la mesure de niveau d'hélium.

Afin d'intégrer des équipements dialoguant avec le protocole Hart, j'ai ajouté sur le réseau une passerelle FIP/HART.

Sous-ensemble armoire d'instrumentation cryostat 1.

Dans ce sous-ensemble, nous trouvons un îlot pneumatique festo11 et un boîtier CABTF11 de mesure de température pour le cryostat 1.

Sous-ensemble armoire d'instrumentation cryostat 2.

Ce sous-ensemble est identique à celui décrit précédemment en s'adressant au cryostat 2.

Pour les besoins de communication en MODBUS avec les régulateurs et l'alimentation 25 kA, j'ai mis un coupleur déporté FIP/MODBUS développé dans le cadre d'une R&D du service.

Dans les paragraphes qui suivent je présente les différents équipements raccordés au réseau WorldFIP.

3.4.1.1. CABTF (Centrale d'Acquisition Basse Température Fipée).

Nous avons sous traité le développement au laboratoire du CEA-Grenoble SBT (Service Basse Température) d'une centrale d'acquisition pour la mesure des températures entre 1,5 K et 300 K, appelée CABTF.

Ces développements ont fait l'objet d'un transfert de technologie en 1998 vers la société MII qui fabrique et commercialise désormais les modules CABTF sous licence CEA.



Figure 3-3 : Photo de la CABTF.

La CABTF assure l'acquisition et le traitement de 8 à 16 mesures de résistance suivant une période maximale de 150 ms ou synchronisée sur une variable FIP jusqu'à 1 seconde. La gamme de résistance s'étend de 0 à 20 kOhms avec une commutation automatique des sources de mesure (4 fils) par générateur de courant ou de tension, pour une résistance de 0 à 150 Ohms, la mesure s'effectue avec un courant de 100 ??, et pour une résistance de 150 à 20 kOhms, la mesure est faite avec une tension de 15 mV. Ces caractéristiques permettent la mesure de basses températures avec des sondes du type carbone, cernox ou platine 100 Ohms.

La commutation du générateur de courant au générateur de tension permet de s'affranchir du problème d'auto-échauffement des sondes dû au courant de mesure aux très basses températures (inférieur à 4,2 K).

Intérêts.

La figure 3-4 montre une comparaison entre une chaîne de mesure câblée sur une CABTF et une chaîne de mesure traditionnelle.

Sur la figure 3-4a, une simplification du câblage est réalisée, car le raccordement en mesure 4 fils de la sonde de température sur le boîtier est direct. Le traitement de la mesure et la conversion en grandeur physique sont assurés par le micro-contrôleur de la CABTF. Cela déporte le traitement afin de soulager l'U.C. de l'API.

Par contre, sur la figure 3-4b, le câblage nécessite plus de modules. La mesure de la sonde de température passe par des conditionneurs. Une transformation de la mesure 4 fils en 4-20 mA est faite (mesure de la résistance proportionnelle en 4-20 mA). Cette solution nécessite également le raccordement sur un bornier d'entrée analogique qui regroupe plusieurs voies, afin d'utiliser un seul câble pour relier la carte d'entrées analogiques du CE8035 déporté. La mesure 4-20 mA est numérisée en valeur entière 0-32000 points, puis diffusée sur réseau FIP. Le traitement de la mesure doit être alors assuré dans l'U.C. du C370. Une mise à l'échelle du signal 4-20 mA en valeur de la résistance est réalisée par la fonction $y = a x + b$. Enfin, on calcule la température par l'intermédiaire d'un polynôme de forme inverse-logarithmique d'ordre 4.

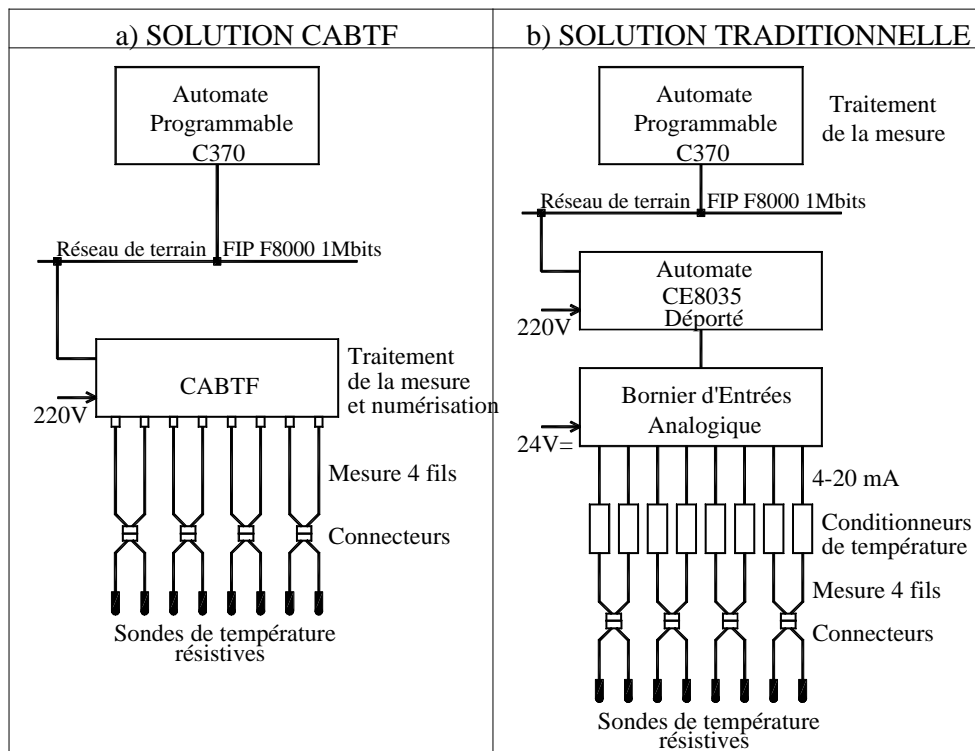


Figure 3-4 : Comparaison des solutions de la CABTF.

Comme vous pouvez le constater, la solution traditionnelle est lourde à mettre en œuvre et nécessite un traitement dans l'API, tandis que la solution à base de la CABTF simplifie énormément le câblage d'où la réduction du coût. Une meilleure fiabilité et une plus grande souplesse d'utilisation sont ainsi constatées ; le dépannage en est de ce fait, facilité.

Le tableau 3-1 présente un comparatif des coûts des deux solutions. L'estimation est calculée suivant les tarifs accordés aux CEA et les coûts internes.

	Solution CABTF			Solution traditionnelle	
	8 voies	16 voies		8 voies	16 voies
Etude	2.400 F	3.600 F	Etude	7.200 F	9.600 F
Câblage	9.900 F	19.800 F	Câblage	22.110 F	42.360 F
CABTF	13.400 F	19.200 F	Automate CE8035 1/10 du prix	500 F	500 F
			Carte d'entrée	4.790 F	4.790 F
			Bornier	2.100 F	2.100 F
			Conditionneurs	10.400 F	20.800 F
Total	25.700 F	42.600 F	Total	47.100 F	79.750 F

Tableau 3-1 : Comparatif des coûts CABTF.

☞ Traitements internes.

La CABTF assure l'acquisition, le traitement du signal et la mise à l'échelle en grandeur physique, par 2 polynômes de degré 3, ou 2 polynômes logarithmiques de degré 3.

Polynômes de degré 3 :

si $R < R_{cp}$

alors ☞ $T = a_0 + a_1 \cdot R + a_2 \cdot R^2 + a_3 \cdot R^3$

sinon ☞ $T = b_0 + b_1 \cdot R + b_2 \cdot R^2 + b_3 \cdot R^3$

fin

R_{cp} = Résistance de commutation du polynôme

Polynômes logarithmiques de degré 3 :

si $R < R_{cp}$

alors ☞ $T = 1 / (a_0 + a_1 \cdot \text{Ln}(R) + a_2 \cdot \text{Ln}(R)^2 + a_3 \cdot \text{Ln}(R)^3)$

sinon ☞ $T = 1 / (b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(R) + b_2 \cdot \text{Ln}(R)^2 + b_3 \cdot \text{Ln}(R)^3)$

fin

Il met à disposition l'état (status) et les valeurs des mesures sur le réseau FIP par production d'une variable périodique, ainsi que tous les paramètres de réglage et les mesures avant traitement.

La CABTF permet le téléchargement des paramètres de conversion en ligne, et la lecture de valeurs de forçage ou de repli en cas de défaut de la sonde. Il tient compte d'une variation limitée de mesure par un seuil réglable DT/dt sur sa valeur dérivée. Une sauvegarde des paramètres de chaque voie est assurée par une flash EEPROM.

Les possibilités de forçage nous permettent d'effectuer le chargement en ligne des coefficients de sonde, avec le contrôle d'un ré-étalonnage sans arrêt du processus.

Exemple de polynôme d'une sonde cernox TE3023C.

Les coefficients du polynôme sont calculés avec le logiciel Matlab.

$$a_2 = -2,8753e-02 \quad a_1 = 1,2180e-01 \quad a_0 = -1,7395e-01 \quad a_3 = 2,3407e-03$$

Avec le changement de courbe à 358 ohms \approx 41 K

$$b_2 = -1,3401e-03 \quad b_1 = -1,7056e-01 \quad b_0 = 6,6185e-01 \quad b_3 = 2,0255e-03$$

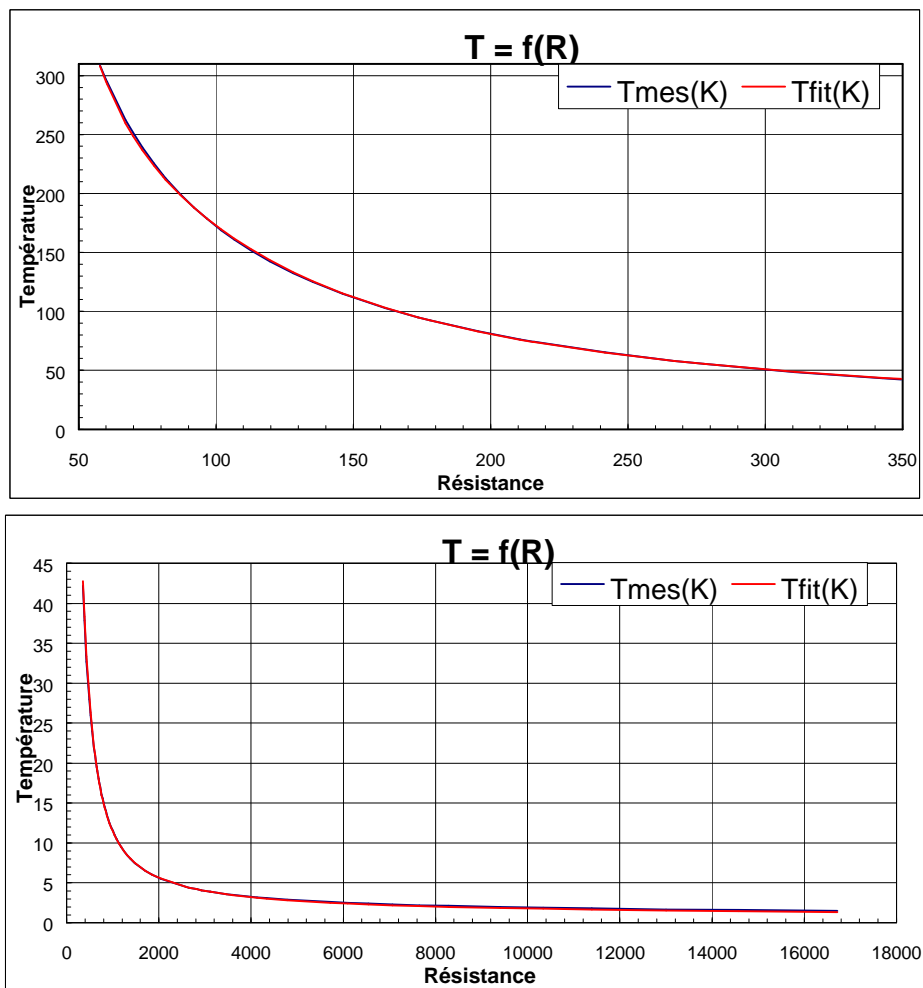


Figure 3-5 : Courbe température sonde cernox.

~~Les~~ Echanges des variables.

L'échange de données avec l'automate principal est assuré par la consommation et la production de variables périodiques suivant le protocole WorldFIP.

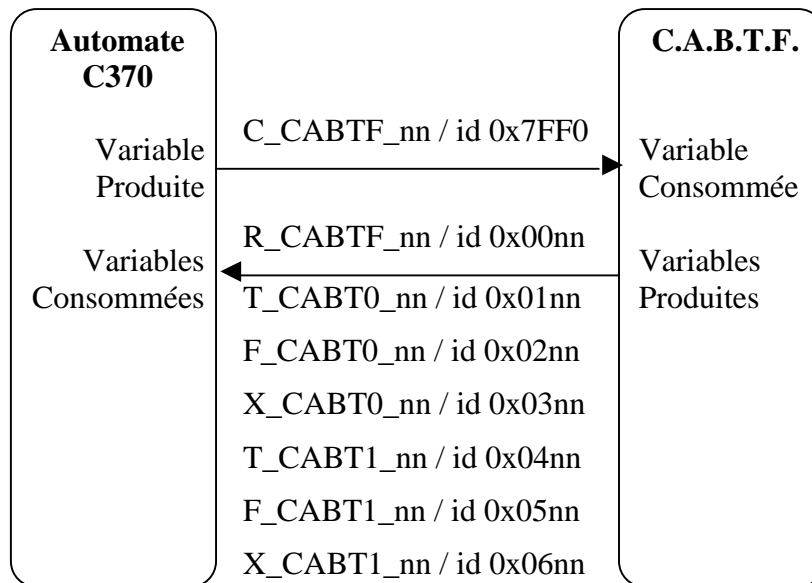


Figure 3-6 : Schéma de l'échange des données transmises de la CABTF.

L'indice nn correspond au numéro de stations sur le réseau.

La périodicité des échanges est de 150ms pour les 3 CABTF utilisés sur W7X.

Variable consommée par la CABTF.

C_CABTF_nn / id 0x7FF0 : Variable de commande qui permet de configurer la CABTF et d'assurer le synchronisme réglable de 150 à 1000ms des acquisitions sur l'ensemble des CABTF branchées sur le réseau FIP (quand cela est nécessaire).

Cette variable de commande sera remplacée à terme par une communication à travers la messagerie FIP suivant le protocole TCP/IP. Cette variable de commande transporte à ce jour un protocole très proche du protocole MODBUS [13] qui est décrit en annexe 11.

VARIABLES PRODUITES PAR LA CABTF.

R_CABTF_nn / id 0x00nn : Variable de réponse à une requête pseudo MODBUS.

T_CABT0_nn / id 0x01nn : Variable de mesure de la carte 0, avec 2 mots pour les bits d'états et les bits de commandes, puis 16 mots pour les 8 mesures de températures converties en flottant IEEE 32 bits. Les variables sont remplacées en temps réels par les variables de forçages (sur demande de forçage, ou sur repli d'un défaut sonde minimum ou maximum atteint).

F_CABT0_nn / id 0x02nn : Variable de forçage ou de repli des 8 voies de la carte 0.

X_CABT0_nn / id 0x03nn : Variable de la carte 0, des valeurs des résistances brutes et des valeurs physiques réelles converties (non forçable).

T_CABT1_nn / id 0x04nn : Variable de mesure de la carte 1, idem.

F_CABT1_nn / id 0x05nn : Variable de forçage ou de repli des 8 voies de la carte 1.

X_CABT1_nn / id 0x06nn : Variable de la carte 1, des valeurs de résistances brutes et des valeurs physiques réelles converties (non forçable).

Nom de la VCOM	Identificateur	Commentaire
C_CABTF_nn	id 0x7FF0	Commande de la Cabtf produite par le C370
R_CABTF_nn	id 0x00nn	Réponse de la Cabtf consommé par le C370
T_CABT0_nn	id 0x01nn	Mesure de la Cabtf consommé par le C370
F_CABT0_nn	id 0x02nn	Forçage de la Cabtf consommé par le C370
T_CABT1_nn	id 0x04nn	Mesure de la Cabtf consommé par le C370
F_CABT1_nn	id 0x05nn	Forçage de la Cabtf consommé par le C370

Tableau 3-2 : Identificateurs des variables FIP pour la CABTF.

Echantillonnage des acquisitions dans la CABTF.

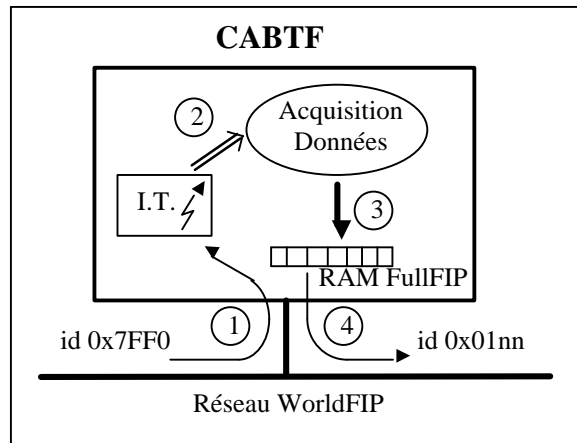


Figure 3-7 : Schéma du synchronisme de la CABTF.

La figure 3-7 représente le mécanisme de synchronisation des valeurs mesurées dans le micro-contrôleur de la CABTF. La circulation de la variable de commande produite par notre A.P.I. id 0x7FF0 (1) génère une interruption dans la tâche d'acquisition. Cet I.T. ordonne (2) un transfert des données d'acquisitions dans la RAM du composant FullFIP (3) de la CABTF. La variable de mesure id 0x01nn est ensuite produite sur le réseau (4) sur demande de l'arbitre de bus.

La CABTF exécute 10 acquisitions par voie et effectue leur moyenne avant de rafraîchir sa base de donnée interne. Le temps de traitement réalisé pour les 16 voies est de 150 ms. Nous obtenons donc dans le cas le plus défavorable, des mesures avec une mémorisation maximale de 150 ms. Grâce à cette synchronisation, nous avons une maîtrise du temps.

Cette fonctionnalité permet de prendre une "photo" de toutes les stations de l'installation à un instant T avec une précision temporelle de 150 ms maximum.

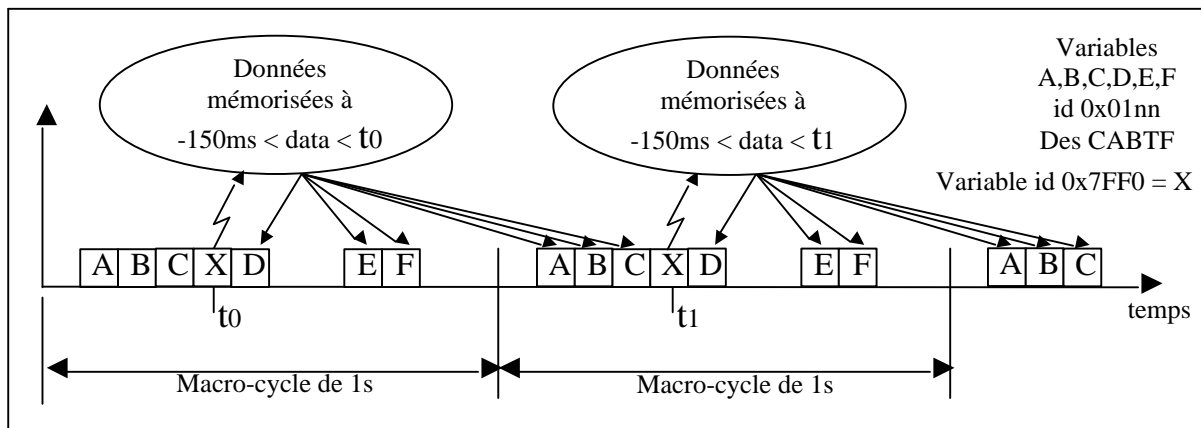


Figure 3-8 : Chronogramme du synchronisme de la CABTF.

3.4.1.2. FESTO (Terminal de distributeurs pneumatique).

Ces terminaux de distributeurs pneumatiques permettent de centraliser le pilotage des vannes pneumatiques grâce au réseau WorldFIP.



Figure 3-9 : Photo du FESTO.

~~Intérêts.~~

Il s'agit d'un équipement modulaire avec E/S numériques et embases pneumatiques. Il offre des possibilités d'extension ou de transformation ultérieures. Les distributeurs pneumatiques sont compacts, avec une commande manuelle auxiliaire pour chaque bobine de distributeur.

Il assure un câblage et une conception simplifiés des installations. Les distributeurs sont prémontés, et les bobines sont précâblées en usine. L'îlot pneumatique nécessite seulement une alimentation en air comprimé, et un échappement d'air centralisé.

Grâce au réseau WorldFIP cette équipement offre la possibilité de connexion à différents types d'automates. Une économie de composants de sortie est faite au niveau du système de commande. Une transmission économique des données peut être réalisée sur des longues distances avec des vitesses élevées. Le réseau permet la possibilité de connecter un grand nombre d'abonnés. Comme l'appareil centralise plusieurs distributeurs pneumatiques, le diagnostic se trouve simplifié.

Par contre, cet appareil n'intègre que le protocole FIPIO de Schneider ; dans le protocole FIPIO, il n'y a pas de messagerie. Celui-ci utilise uniquement des variables périodiques ou apériodiques. Le FIPIO met les variables sans période fixe, les unes après les autres.

Pour l'intégrer sur le réseau FIP d'un C370, ALSTOM a dû réaliser quelques adaptations dans la gestion de son réseau.

La variable FIP des présences utilisée dans le protocole FIPIO a été réduite de moitié en taille chez ALSTOM pour s'adapter à ce protocole.

Pour interagir avec cette nouvelle configuration, il est nécessaire de retirer la redondance de média dans l'automate C370.

Enfin nous sommes obligés de surveiller la gestion du mode de marche par variable périodique.

La figure 3-10 illustre la comparaison avec un circuit de commande de vanne pneumatique traditionnel et le montage avec un boîtier FESTO.

Sur la figure 3-10a, il y a simplification du câblage. On vient directement en réseau FIP sur le boîtier FESTO, alors que sur la figure 3-10b on passe par une carte de sortie logique, un bornier de raccordement, avant d'atteindre les électrovannes.

Les coûts sont réduits grâce à une simplification du montage ; le dépannage est également plus facile à réaliser.

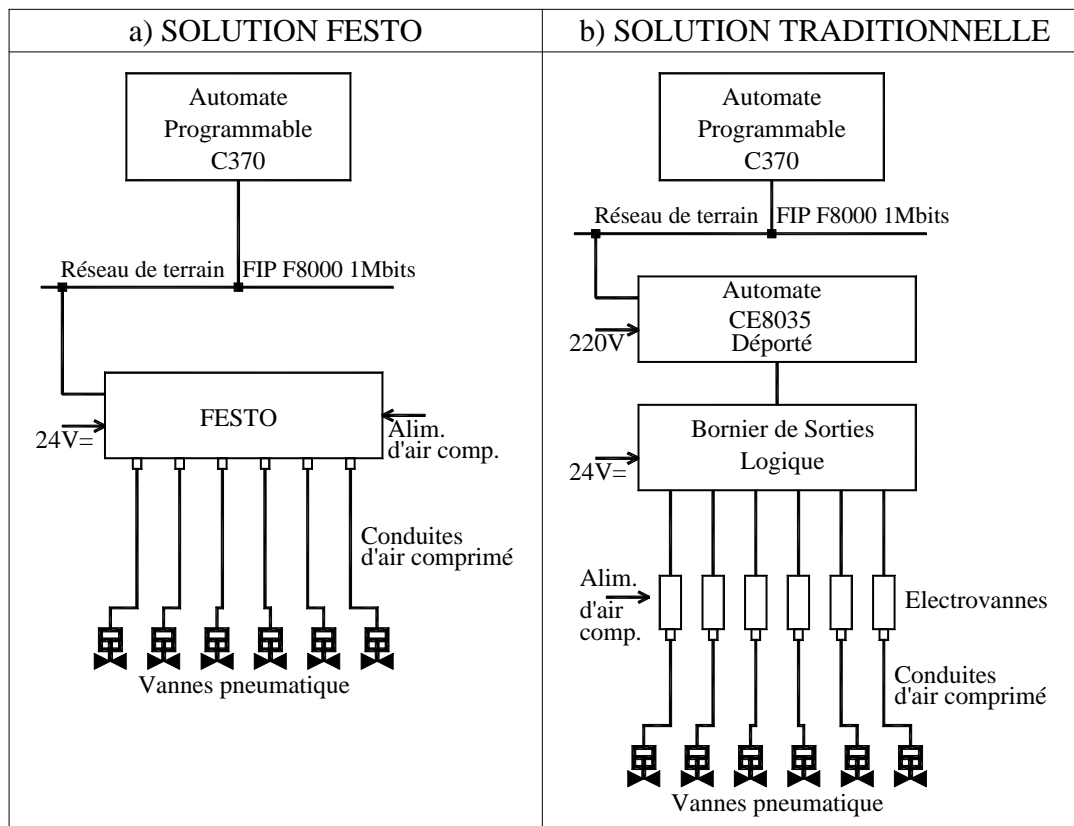


Figure 3-10 : Comparaison des solutions du FESTO.

Le tableau 3-3 présente un comparatif des coûts des deux solutions. L'estimation est calculée suivant les tarifs accordés aux CEA et les coûts internes.

	Solution FESTO			Solution traditionnelle	
	6 voies	20 voies		6 voies	20 voies
Etude	2.400 F	3.600 F	Etude	7.200 F	9.600 F
Câblage	9.400 F	13.700 F	Câblage	10.900 F	18.000 F
FESTO	8.270 F	17.130 F	Automate CE8035 1/10 du prix	500 F	500 F
			Cartes de sorties	960 F	1.920 F
			Borniers	2.045 F	4.090 F
			Electrovannes	1.698 F	5.624 F
Total	20.070 F	34.430 F	Total	23.303 F	39.734 F

Tableau 3-3 : Comparatif des coûts FESTO.

~~///~~Echanges des variables.

L'échange de données avec l'automate principal est assuré par la consommation et la production de variables périodiques suivant le protocole WorldFIP.

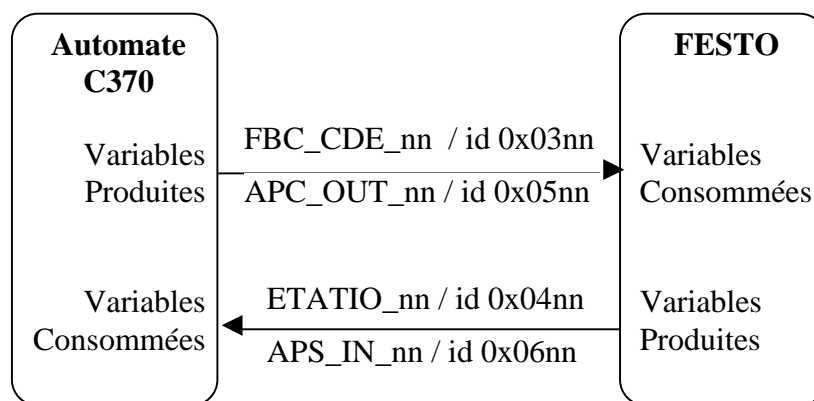


Figure 3-11 : Schéma de l'échange des données transmises du FESTO.

L'indice nn correspond au numéro de stations sur le réseau.

Variables consommées par le FESTO.

FBC_CDE_nn / id 0x03nn : Variable de télécommande du mode de mise en marche.

APC_OUT_nn / id 0x05nn : Variable d'écriture des sorties.

Variables produites par le FESTO.

ETATIO_nn / id 0x04nn : Variable d'état du terminal de distributeurs.

APS_IN_nn / id 0x06nn : Variable de lecture des entrées.

Nom de la VCOM	Identificateur	Commentaire
APC_OUT_nn	id 0x05nn	Sortie du Festo produite par le C370
APS_IN_nn	id 0x06nn	Entrées du Festo consommé par le C370
ETATIO_nn	id 0x04nn	Etat du Festo consommé par le C370
FBC_CDE_nn	id 0x03nn	Commande du Festo produite par le C370

Tableau 3-4 : Identificateurs des variables FIP pour le FESTO.

3.4.1.3. Châssis CE80-35 d'entrées/sorties déportées.

Le concentrateur d'E/S déportées est un module intelligent qui assure l'interface entre des modules d'E/S Alspa CE80-35 [14] et le réseau WorldFIP. Il peut supporter jusqu'à 19 modules d'E/S en utilisant deux platines de 10 emplacements connectées par un câble d'extension. Le concentrateur d'E/S déportées et les modules qu'il dessert forment un ensemble appelé station.

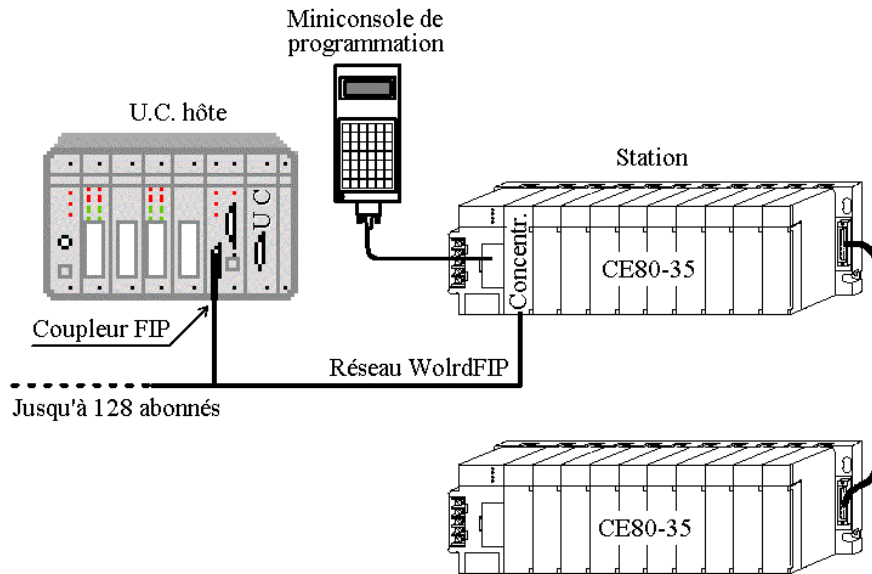


Figure 3-12 : Schéma de principe du concentrateur d'E/S CE80-35.

Intérêts.

L'Alspa CE80-35 permet le regroupement d'entrées et sorties, logique et analogique. Suivant les applications, ces concentrateurs autorisent une disposition géographique déportée.

La conception d'une installation est facilitée grâce à la modularité de cartes. Les données des cartes d'entrées sont mises à disposition sur le réseau et les commandes des cartes de sorties venant de l'automate principal sont rafraîchies.

Fonctionnalités.

Le concentrateur d'E/S déportées exécute les fonctions suivantes :

Cet appareil contrôle le fonctionnement de la station dans le mode sélectionné. Le CE80-35 scrute les modules d'E/S logiques et analogiques et gère la cadence de scrutation

des E/S. Une attribution des variables applicatives FIP aux données d'E/S est faite. Le concentrateur détecte les défauts des modules et du système et les signale au réseau FIP. Il permet une surveillance et une configuration limitées en mode autonome (Standalone) avec la miniconsole de programmation. Dans le cas d'une coupure d'alimentation, il conserve sa configuration réseau et ses données de forçage. Le forçage des E/S peut être assuré avec la miniconsole de programmation. Le CE80-35 détecte et enregistre les transitions des entrées. Il supporte les services de messages FIP. L'appareil répond à un signal de synchronisation externe ou à un événement de synchronisation du réseau FIP. D'autres fonctionnalités sont disponibles, comme par exemple l'activation des sorties par clignotement ou par impulsions, mais aussi le filtrage des entrées et le traitement des battants.

Pour l'avenir, on notera que le remplacement de l'automate principal pour une raison d'obsolescence, nécessitera l'utilisation d'un automate compatible avec la gamme ALSPA, ou le développement d'une passerelle spécifique afin de gérer les modes de marche et de démarrage du CE80-35.

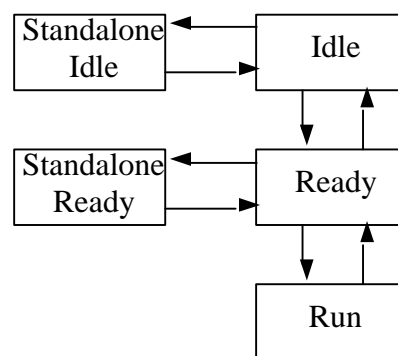


Figure 3-13 : Mode de marche du concentrateur d'E/S CE80-35.

Le concentrateur peut fonctionner dans les modes suivant :

- ?? Le mode "Idle" (inactif),
- ?? Le mode "Standalone Idle" (autonome inactif),
- ?? Le mode "Ready" (prêt),
- ?? Le mode "Standalone Ready" (autonome prêt),
- ?? Le mode "Run" (marche).

3.4.1.4. Niveau d'Hélium.

Dans les expériences liées au cryomagnétisme où l'hélium liquide est présent, il est primordial de connaître à tout moment le niveau d'hélium liquide contenu soit dans un cryostat, soit dans un bidon. La méthode visuelle étant impossible à appliquer, il est nécessaire d'avoir des instruments de mesure adaptés.

Le SIG possède une grande expérience dans la mesure d'hélium liquide et à ce jour, plus d'une centaine de tiroirs de mesure de niveau d'hélium (toutes versions confondues) équipent aussi bien des laboratoires français qu'étrangers.



Figure 3-14 : Tiroir de mesure d'hélium prototype 4 voies.

~~Les~~ Intérêts.

Cette nouvelle version entre de plain pied dans l'instrumentation dite "intelligente", car le cœur de cet appareil est un micro-contrôleur.

Ce tiroir met à disposition les mesures du niveau d'hélium sur le réseau FIP, ainsi que les seuils et défauts sondes, avec un regroupement de 4 voies de mesure par boîtier.

Il est autonome et simple d'utilisation. Là encore, il y a une simplification du câblage et un coût diminué.

☞ Fonctionnalités.

Le micro-contrôleur "cerveau" du tiroir de mesure, associé à son électronique gère à la fois un affichage LCD¹ et quatre sondes de mesure. Il calcule des moyennes sur les mesures en tenant compte des longueurs de câblage, détecte les défauts et procède à une calibration automatique des sondes par menu déroulant. Il affiche les valeurs d'étalonnage en ohms et la mesure du niveau présent en % et transmet (en option) sur le réseau FIP l'état et la valeur de la mesure de chaque sonde. De plus, il est parfaitement possible de personnaliser les messages affichés à l'écran, et ce dans plusieurs langues (anglais, allemand, italien...). Ainsi l'ergonomie générale de l'appareil a été simplifiée.

Toutes ces opérations sont réalisées par un seul micro-contrôleur, et l'utilisation d'une électronique classique aurait difficilement abouti à ce même résultat.

☞ Caractéristiques techniques.

- ?? 4 voies de mesure indépendantes,
- ?? Mesure 4 fils,
- ?? Détection défaut sonde,
- ?? Sorties analogiques 4-20 mA et 0-10 V
- ?? Etendue de mesure 10 à 1500 cm (sonde de 750 ? /m),
- ?? Accès au réseau FIP (n° de station programmable, protocole intégré),
- ?? Etalonnage automatique des sondes,
- ?? Détection automatique des sondes raccordées, etc.

¹ LCD = Afficheur à cristaux liquides.

~~Ex~~Echanges des variables.

La trame de réponse RP_DAT est composée de 2 octets de données et un octet de status MPS.

Les deux octets de données se décomposent comme suit :

w x = 1er octet	w correspond au numéro de voie. x correspond à l'état de la voie (0 = pas sélectionnée, 1 = sélectionnée, et F = défaut sonde).
y z = 2ème octet	yz correspond au niveau de la voie.

Exemple :

1000h = Voie 1 non sélectionnée niveau à 0%.

11FFh = Voie 1 sélectionnée niveau à 100%.

1F00h = Voie 1 en défaut plus de lecture de niveau.

2176h = Voie 2 sélectionnée niveau à 46,27.

2177h = Voie 2 sélectionnée niveau à 46,66.

2F00h = Voie 2 en défaut plus de lecture de niveau.

FFh(255d) correspond à 100%, une simple règle de trois permet de retrouver la valeur en % du niveau.

3.4.2. Communication et échange de données. (passerelles)

3.4.2.1. Coupleur déporté FIP/MODBUS.

Ce coupleur déporté fait partie d'une recherche et développement dans le cadre de notre service [12]. Dans nos installations nous sommes souvent confrontés au problème qui concerne la mise en œuvre de régulateurs externes ou tout autre type d'appareil ne pouvant pas être relié sur le réseau WorldFIP. En effet, les spécificités de FIP (couplage avec des composants spécialisés, donc avec un surcoût évident) font que ce réseau est assez peu diffusé dans les produits grand public. Les parts de marché associées à cette technologie ne semblent pas encore aujourd'hui inciter les industriels à investir dans ce secteur. La liaison MODBUS avec micro-contrôleur semble être la solution la plus économique pour les fabricants de composants d'automatisme. La mise en œuvre logicielle est reportée à la charge du client.

Donc, comme la plupart de ces objets communiquent en liaison série asynchrone avec le protocole MODBUS [13], nous devons développer jusqu'à maintenant un programme dans l'API. Cela implique la gestion d'un coupleur asynchrone MODBUS Maître dans l'automate et les erreurs de liaison avec les esclaves. Le déroulement des étapes de programmation s'établit de la manière suivante : initialisation des paramètres, composition de la question avec son chargement dans les registres, émission de la question puis acquittement et rangement de la réponse en mémoire (voir annexe 12, le grafcet et programme).

Les contraintes liées à cette démarche nécessitent de tester et valider le programme sur chacune de nos nouvelles installations. Si une évolution d'un esclave survient, une adaptation logicielle est nécessaire. De plus, il faut savoir gérer les priorités des échanges MODBUS.

Sur l'installation W7X, nous avons une liaison avec l'alimentation 25 kA qui autorise le dialogue avec celle-ci et six régulateurs autonomes pour le maintien à la température ambiante de tête ADI. La figure 3-15 montre l'ordonnancement des échanges MODBUS sur W7X. Ici les esclaves sont interrogés les uns après les autres.

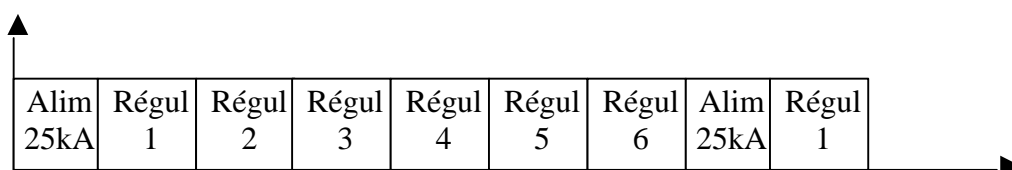


Figure 3-15 : Ordonnancement des échanges MODBUS.

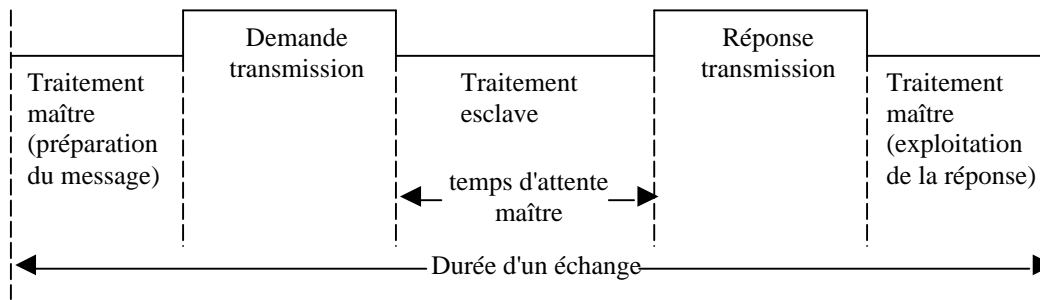


Figure 3-16 : Durée d'un échange type demande réponse en binaire.

Durée d'un échange = temps de traitement du maître
+ temps de traitement de l'esclave
+ temps de transmission

La figure 3-16 illustre la durée d'un échange type demande réponse en binaire. Les différentes durées d'échanges sont calculées dans le tableau 3-5.

Durée d'un échange type Demande ==> Réponse						
Fonction	Nombre de mot ou bit	Temps de traitement du maître (ms)	Temps de traitement de l'esclave (ms)	Temps de transmission (ms)	Temps de transmission + 4 ms	Total de l'échange (ms)
Lecture n mot	NM	$4,5 + 0,7 * NM$	$3 + 0,75 * NM$	$(13 + 2 * NM) * f/V$	+ 4 ms	Total
Alimentation	4	7,3	6	21,88	25,88	39,18
Alimentation	7	9,4	8,25	28,13	32,13	49,78
Régulateur	9	10,8	9,75	32,29	36,29	56,84
Lecture n bit	NB	$6 + 0,09 * NB$	$4 + 0,066 * NB$	$(13 + NB / 8) * f/V$	+ 4 ms	Total
Régulateur	7	6,63	4,462	15,36	19,36	30,46
Ecriture un bit	NB	5	4	$16 * f / V$	+ 4 ms	Total
Régulateur	1	5	4	16,67	20,67	29,67
Ecriture 1 mot	NM	5	3	$16 * f / V$	+ 4 ms	Total
Régulateur	1	5	3	16,67	20,67	28,67
Ecriture n mot	NM	$5 + 0,65 * NM$	$3 + 0,7 * NM$	$(17 + 2 * NM) * f/V$	+ 4 ms	Total
Alimentation	1	6,65	4,7	19,79	23,79	35,14

Tableau 3-5 : Calculs des durées d'échanges MODBUS.

f = le nombre de bits du format de transmission (y compris start, parité, stop).
V = vitesse de transmission en kbauds, ici 9600 bauds.

Pour l'explication qui suit les fonctions 1 à 16 de MODBUS sont décrites en annexe 11.

Pour l'alimentation 25 kA, j'ai besoin de réaliser une lecture de 4 et 7 mots par la fonction 3, cela donne les paramètres et l'état de l'alimentation en deux requêtes. Pour l'écriture de la consigne en courant et les ordres de marches, j'utilise une écriture de 1 mot par la fonction 16 car l'écriture de 1 mot par la fonction 6 n'est pas implémentée dans l'alimentation.

Pour les régulateurs une lecture de 9 mots par la fonction 3 permet de lire tous les paramètres en une seule requête. Une lecture de 7 bits par la fonction 1 est nécessaire pour connaître l'état du régulateur. L'écriture d'un paramètre s'effectue par la fonction 6 qui correspond à l'écriture de 1 mot. Le passage en automatique ou manuelle du régulateur est réalisé par l'écriture de 1 bit par la fonction 5.

Le coupleur déporté FIP/MODBUS.



Figure 3-17 : Photo du coupleur déporté FIP/MODBUS.

Intérêts.

Ce coupleur aura pour but de décharger un automate industriel de la gestion d'une liaison série asynchrone supportant le protocole MODBUS Maître.

Il assurera les fonctions de concentrateur de données par requêtes "MODBUS" maître vers un sous-réseau physique RS485 constitué d'un ensemble de stations raccordées suivant une topologie en BUS.

L'échange des données avec l'automate principal sera assuré par la consommation et la production de variables périodiques suivant le protocole WorldFIP.

Pour simplifier la gestion des échanges avec l'automate principal, ce coupleur devra assurer en automatique une fonction "miroir" d'une zone mémoire de l'automate. La description de cette zone miroir sera définie dans un fichier texte qui devra être téléchargé dans le coupleur par le port série RS232 ou par une liaison TCP/IP à travers la messagerie FIP. Ce fichier dénommé "JBUS.CFG" décrira les échanges à réaliser avec les stations esclaves.

Architecture.

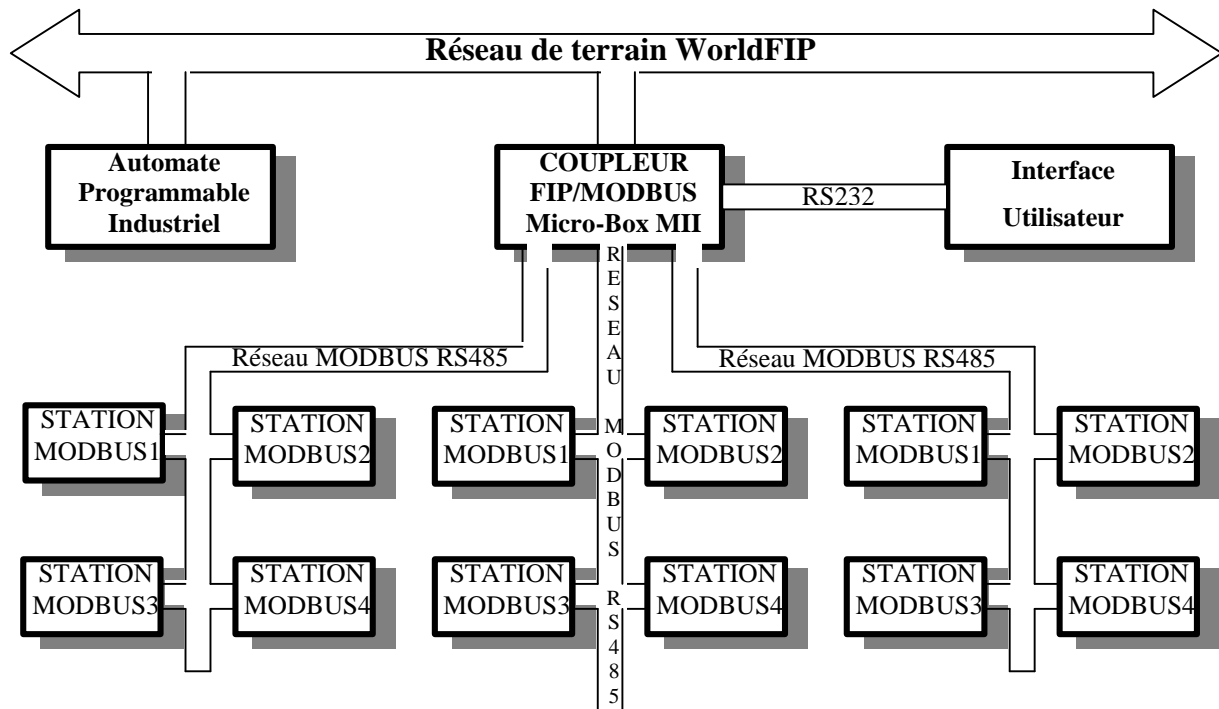


Figure 3-18 : Architecture du coupleur déporté FIP/MODBUS.

La figure 3-18 présente l'architecture du coupleur déporté FIP/MODBUS composée au premier niveau d'une liaison FIP entre L'API et le coupleur, et au second niveau de 4 ports de liaisons RS485 possibles. L'interface utilisateur qui permet de télécharger le fichier de configuration par le port RS232. Le coupleur est réalisé à l'aide d'un boîtier MICROBOX développé par MII. Ce boîtier intègre l'operating système OS-9 qui est un système multitâche temps réel programmable en langage C sous OS-9.

Spécifications des échanges.

Les échanges entre l'API et les esclaves sont définis par le map mémoire des figures 3-19 et 3-20 pages suivantes.

La production de deux variables FIP (PRODFIP id 0x7000 et 0x7001) par le coupleur FIP/MODBUS est nécessaire à la lecture des données dans les esclaves.

La consommation de deux variables FIP (CONSFIP id 0x4000 et 0x4001) par le coupleur FIP/MODBUS est utilisé pour l'écriture des données dans les esclaves.

LECTURES DES DONNEES

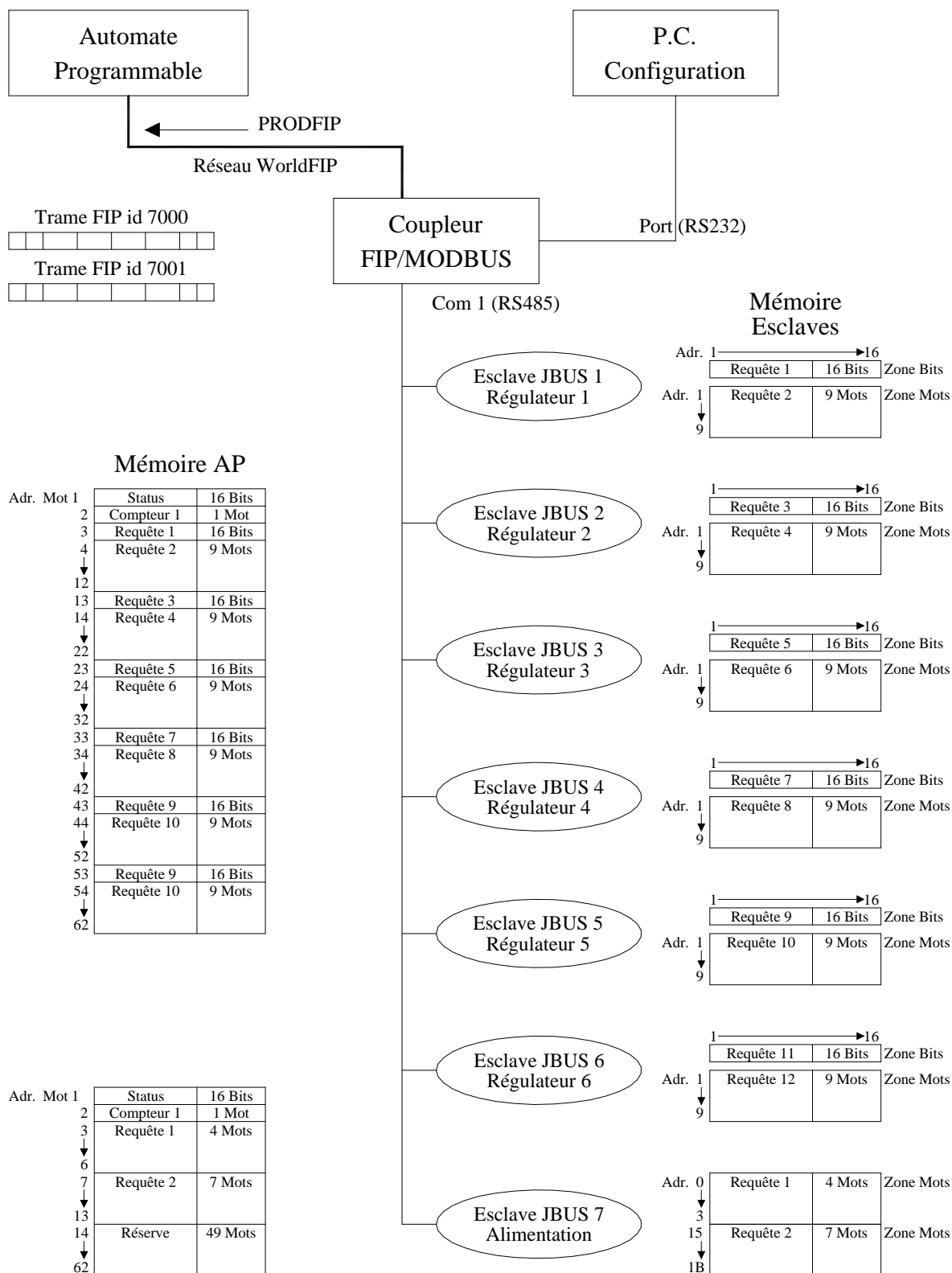


Figure 3-19 : Lectures des données par le coupleur FIP/MODBUS.

ECRITURES DES DONNEES

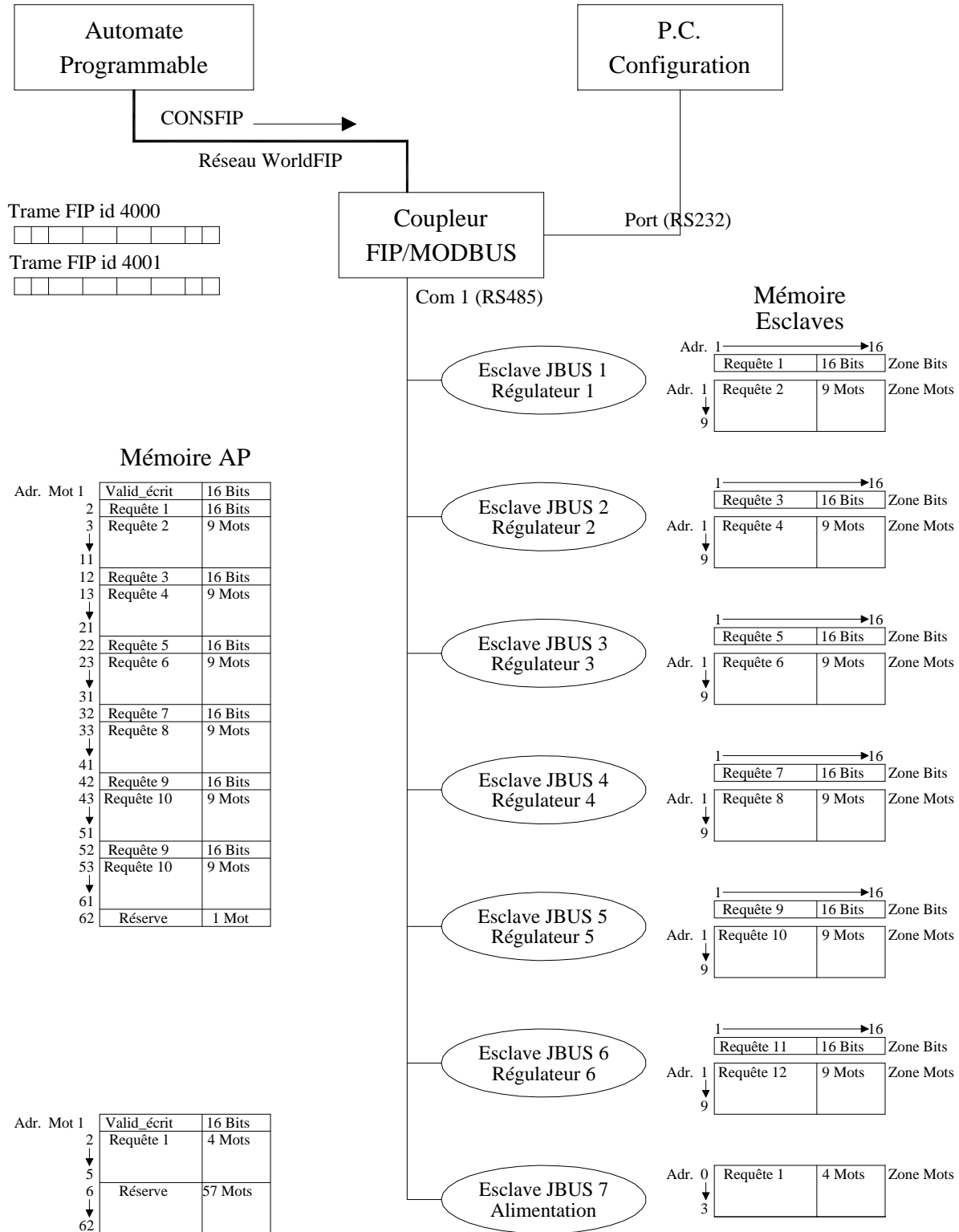


Figure 3-20 : Ecritures des données par le coupleur FIP/MODBUS.

3.4.2.2. Passerelle FIP/HART.

La passerelle FIP/HART DI80 [15] réalise l'interface entre le protocole Hart, utilisé par les capteurs intelligents et le réseau WorldFIP. Cet équipement permet de mettre en œuvre des architectures de contrôle commande en réseau et la maintenance centralisée des capteurs. Le logiciel AMS [18] (Asset Management Solutions) permet la configuration et la maintenance des capteurs sans perturber le fonctionnement du procédé.

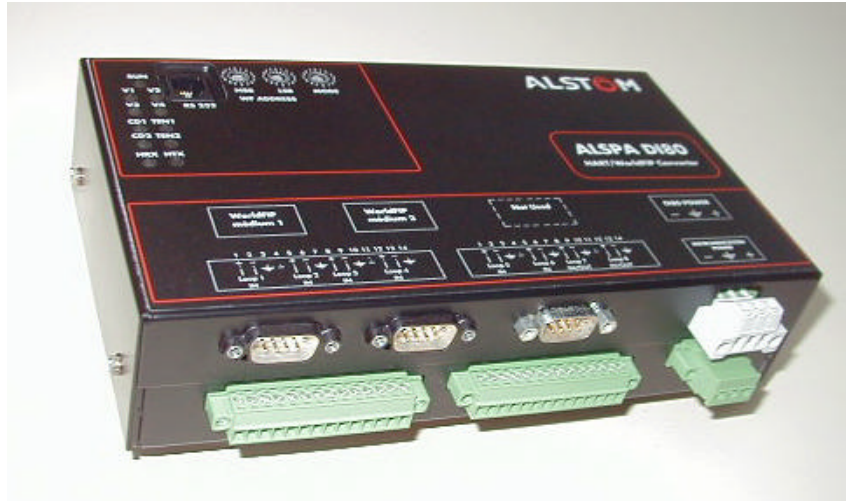


Figure 3-21 : Photo de la passerelle FIP/HART.

L'interface Alspa DI80 est un composant permettant l'intégration des équipements de terrain compatibles Hart dans les systèmes Alspa 8000 (Alstom). Il devient ainsi possible de contrôler, régler, et gérer les équipements compatibles Hart à travers le bus de terrain Alspa. Le "package" de contrôle et de programmation peut accueillir le logiciel AMS de gestion des équipements de Fisher-Rosemount.

D'une manière générale, l'Alspa DI80 fournit la connexion entre le bus de terrain WorldFIP et l'appareillage compatible Hart.

L'Alspa DI80 combine les fonctions de multiplexeur de données et de convertisseur de protocole entre WorldFIP et Hart. Ces fonctions s'appliquent aux fonctions de contrôle des signaux, aussi bien pour le 4-20 mA analogique que pour le protocole Hart numérique.

En tant que multiplexeur, l'Alspa DI80 convertit les signaux dans des trames compatibles avec le standard WorldFIP.

L'Alspa DI80 alimente les équipements connectés.

Le logiciel permettant l'intégration complète du convertisseur dans l'architecture AMS de Fisher-Rosemount est réalisé.

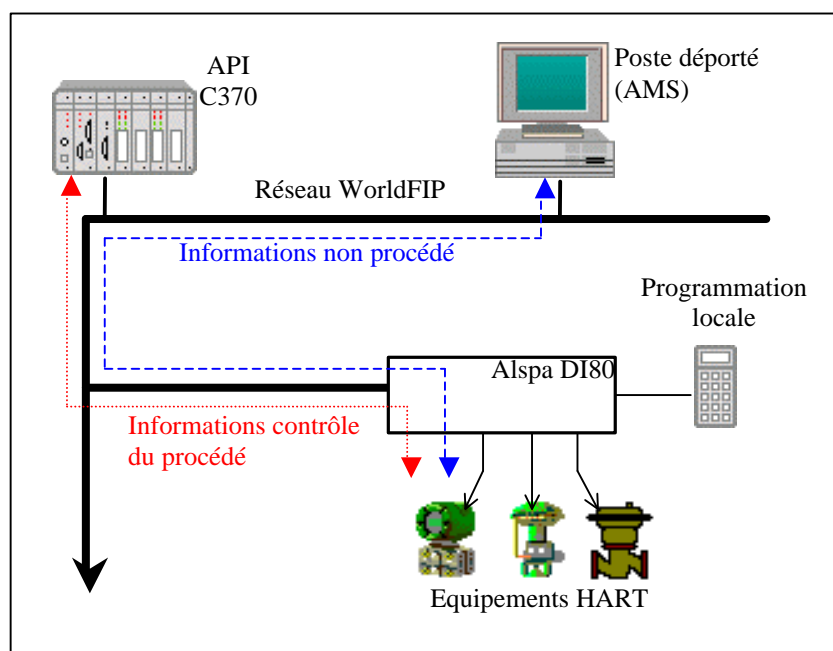


Figure 3-22 : Schéma fonctionnel FIP/HART.

La figure 3-22 présente le schéma fonctionnel avec la passerelle FIP/HART DI80. Les informations d'E/S analogique liées au contrôle du procédé, la gestion du réseau et la surveillance du système circulent par une variable FIP périodique.

Les informations non liées au procédé sont transmises par une variable de messagerie a périodique comprenant les données de configuration de la DI80 et des capteurs Hart.

Les informations de contrôle du procédé vont de la DI80 à l'API C370. Les informations hors procédé passent de la DI80 au poste de configuration contenant le logiciel AMS.

Description des échanges.

La DI80 ne supporte que le protocole WorldFIP. Aux fins de compatibilité, j'ai été obligé de commuter la totalité des abonnés dans ce mode.

Le tableau 3-6 rassemble les variables utiles pour le fonctionnement de la DI80.

Identificateur	Nom de la variable	Machine	Période	Type de variable	Taille	Commentaires
0x0003	P_AMS1_P1	AMS	150	TOCTET	8	Variable produite par Carte CC121 AMS
0x0002	ETATHF	DI80	300	TOCTET	16	DI80 Etat HF produite par DI80
0x0502	HF_PROD	C370	300	TOCTET	8	DI80 HF produite par le C370
0x0602	HF_CONS	DI80	300	TOCTET	64	DI80 HF consomme par le C370

Tableau 3-6 : Identificateurs des variables FIP pour la DI80.

La variable P_AMS1_P1 permet à la carte FIP CC121 mis dans le poste AMS de produire les données liées à la configuration de la DI80 et des capteurs Hart.

La variable ETAT_HF contient les informations utiles pour le suivi du système.

La variable HF_CONS contient les valeurs numériques des entrées analogiques et l'état des données échantillonnées. Cette variable est produite par la DI80 et consommée par l'API.

La variable HF_PROD contient les valeurs numériques de consignes vers les sorties analogiques de la DI80. Cette variable est consommée par la DI80 et produite par l'API.

Dans l'installation W7X nous n'utilisons en entrée que des capteurs de pression.

Les deux variables P_AMS1_P1 et ETAT_HF permettent à la DI80 et à l'application AMS "d'accrocher" leurs demandes respectives de messagerie aperiodique.

Protocole Hart.

Le protocole Hart [17] utilise le Bell 202 standard de communication numérique par modulation de fréquence (FSK \approx Frequency Shift Keying), qui est une superposition du signal numérique de communication au-dessus du signal de bas niveau analogique 4-20 mA, comme le démontrent les figures 3-23 et 3-24. Le protocole Hart permet un champ de communication bidirectionnel pour des informations additionnelles et de gestion de capteur en plus de la mesure venant de l'instrument de terrain.

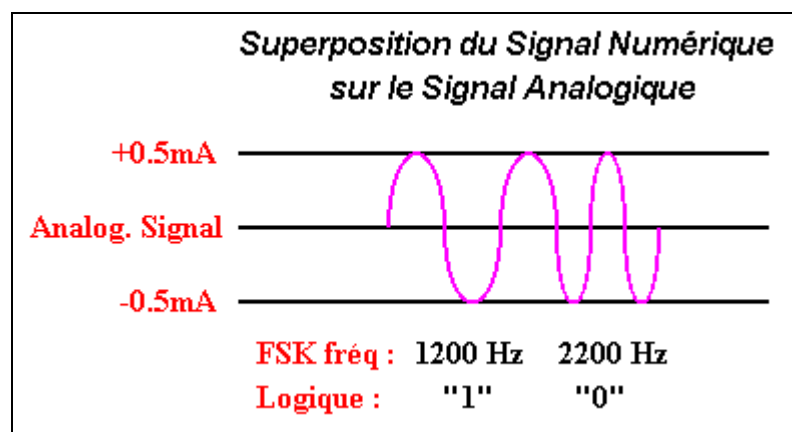


Figure 3-23 : Hart utilise FSK pour le codage numérique de l'information par-dessus le signal 4-20mA.

Le signal numérique est constitué de deux fréquences 1200 Hz et 2200 Hz, représentant respectivement les bits 1 et 0. Le protocole Hart communique à 1200 bauds sans interrompre le signal 4-20mA et permet au serveur de gérer plusieurs capteurs simultanément. Comme le signal numérique FSK est continu, il n'y a pas d'interférence avec le signal 4-20mA.

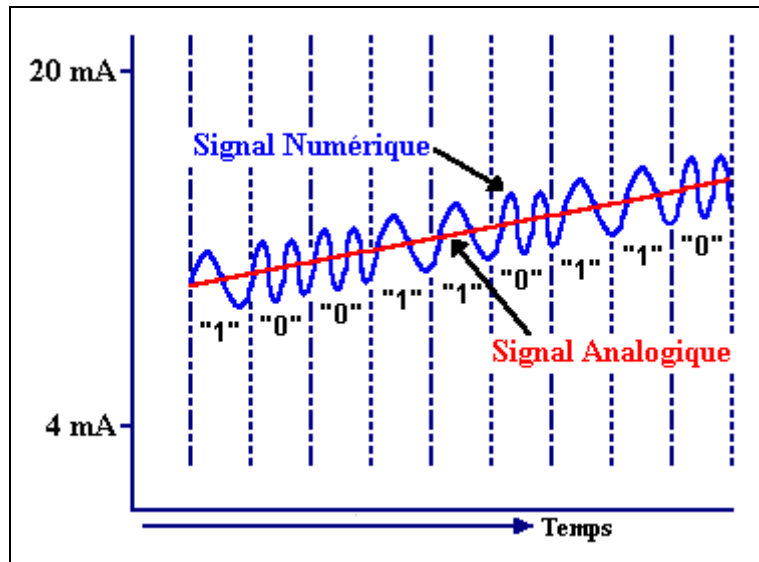


Figure 3-24 : Superposition du signal numérique sur le signal analogique.

Hart est un protocole de communication maître/esclave, ce qui veut dire que les appareils esclaves ne parlent que lorsqu'ils sont questionnés par le maître. La communication peut être faite en mode point à point ou en mode multi-points.

Forme de la trame Hart.

Preambles	SD	Address	CD	BC	Status	DATA	LP
-----------	----	---------	----	----	--------	------	----

où

Preambles : préambules,

SD (Start Delimiter) : caractère de délimitation du début,

Address : Adresse source et destination,

CD (Command Number) : numéro de commande,

BC (Byte Count) : compte d'octet,

Status : état de l'appareil et de la communication (de l'appareil de terrain vers un seul hôte),

LP (Longitudinal Parity) : parité longitudinale (checksum).

Les commandes du protocole hart [16] sont définies dans trois groupes.

Le premier groupe, "commandes universelles", fournit les fonctions qui sont implémentées dans tous les appareils de terrain. Elles sont les suivantes : modèle ID, tag ID (repère), variables procédés (mesure), valeurs d'échelles, limites capteurs, état, date, description, message.

Le second groupe, "commandes de base (standards)", fournit les fonctions communes d'un grand nombre d'appareils de terrain, mais pas tous. Si l'appareil implémente ces fonctions, ces commandes doivent être habituées à s'accomplir entre elles. Elles comprennent : La lecture des variables, les constantes de temps, l'écriture de la gamme du transmetteur, l'étalonnage (zéro, pleine échelle), les auto tests, les unités, le numéro de série.

Le troisième groupe, "commandes spécifiques", fournit les fonctions qui sont plus ou moins uniques dans les appareils de terrain particuliers. Les exemples sont les fonctions spécifiques au modèle, les fonctions de totalisation, la sélection de variables de sortie, la calibration spéciale.

Certains serveurs d'application Hart utilisent des descripteurs d'équipement (DD \approx Device Descriptions) pour obtenir les informations à propos du fonctionnement et des mesures des appareils Hart.

Un descripteur d'équipement, que ce soit pour des transmetteurs, des vannes ou tous autres équipements de terrain, donne une image de tous les paramètres et de toutes les fonctions disponibles dans un langage standardisé (DDL \approx Device Description Language).

Le Hart DDL est utilisé pour écrire le DD, qui rassemble toutes les informations nécessaires à l'application serveur en une simple structure de fichier, afin de communiquer complètement avec l'instrument de terrain.

Le DD identifie les commandes qui sont communes aux appareils, et peut détecter les structures et formats de communication plus spécifiques sur d'autres instruments.

Le DD pour un appareil de terrain Hart est à peu près équivalent à un driver d'imprimante pour ordinateur.

Communication entre la DI80 et le logiciel AMS.

La communication est réalisée suivant le protocole TCP/IP¹ à travers la messagerie FIP a périodique de notre architecture. Pour assurer cet échange TCP/IP, la DI80 dispose d'un logiciel de recherche d'adresse IP à l'initialisation.

L'allocation de l'adresse IP de l'Alspa DI80 est élaborée automatiquement suivant un mécanisme spécifique d'ALSTOM. Ce mécanisme est présenté par la figure 3-25 page suivante.

¹ TCP/IP = Transmission Control Protocol / Internet Protocol.

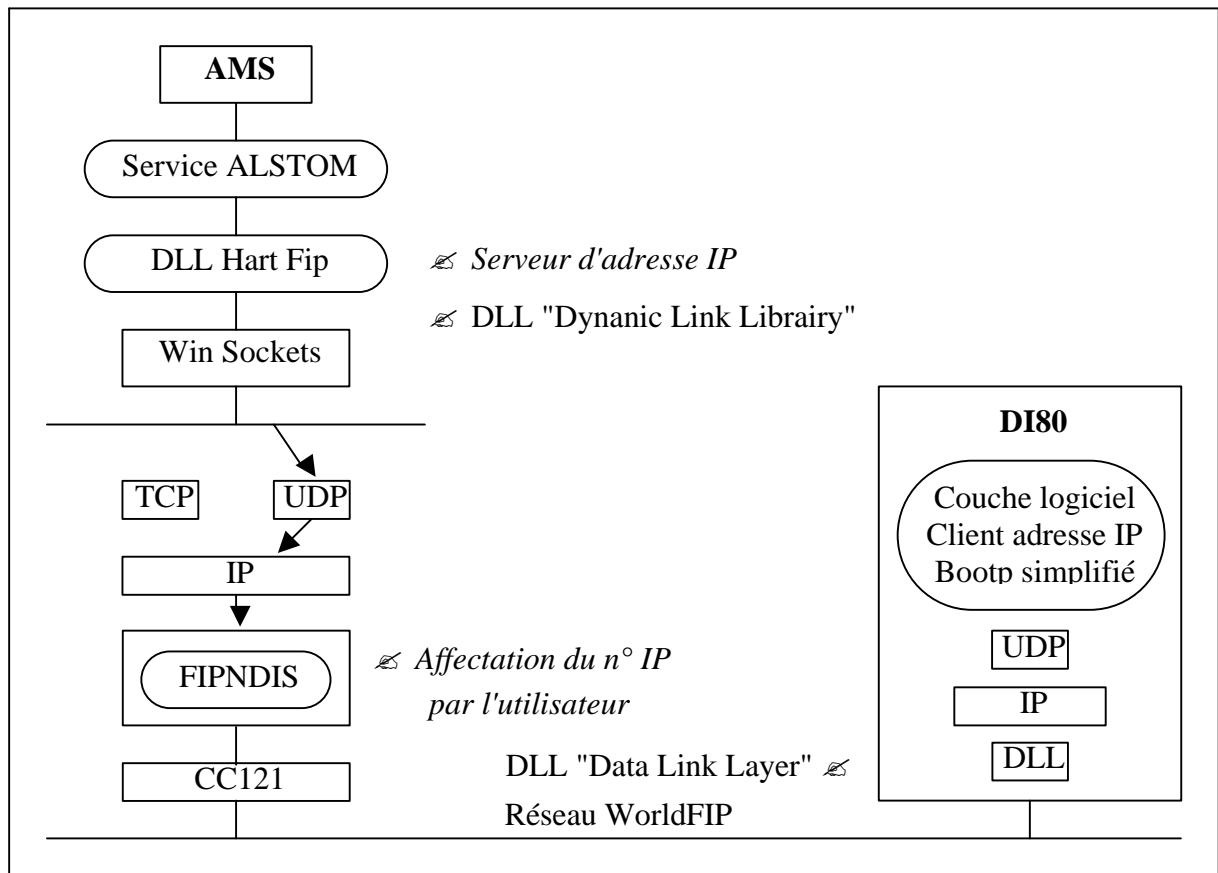


Figure 3-25 : Architecture générale du mécanisme affectation du n° IP.

Pour que la liaison de communication entre le logiciel AMS et la DI80 s'établisse, la DI80 exécute un "bootp"¹ simplifié à sa mise sous tension. Le client DI80 demande suivant le protocole UDP² une adresse IP au serveur. Cette demande s'effectue par la messagerie du réseau WorldFIP et remonte à travers les différentes couches jusqu'à la DLL Hart Fip. Celle-ci fournit une adresse IP à la DI80 en concaténant l'adresse IP de la carte réseau CC121 avec un masque 255.255.255.0 et l'adresse de la station FIP DI80.

Exemple :

Si l'utilisateur a défini une adresse 111.222.33.02 au niveau de la carte réseau FIP CC121 et une station FIP DI80 de numéro d'abonné 03, l'adresse IP de la DI80 sera 111.222.33.03 (adresse de classe A pour un réseau IP).

¹ BOOTP = Bootstrap Protocol est un protocole de démarrage de terminaux X.

² UDP = User Datagram Protocol.

Configuration par AMS.

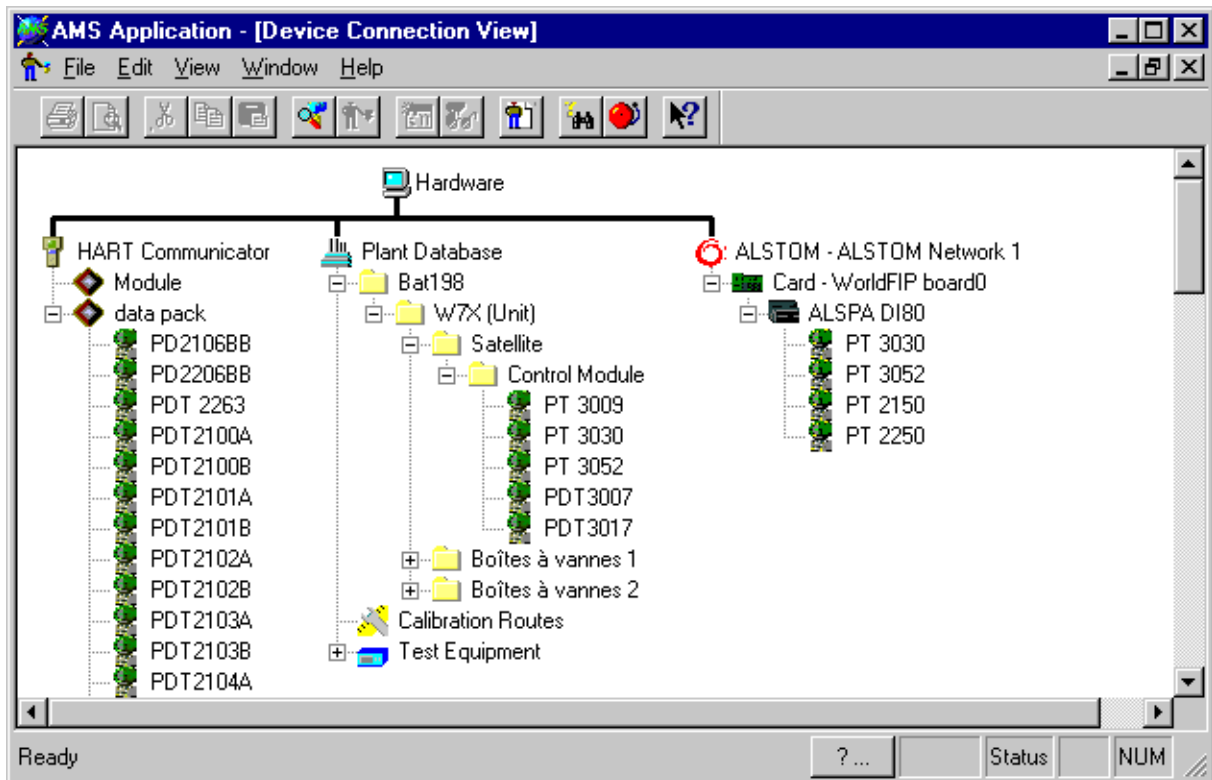


Figure 3-26 : Application AMS - vue de la connexion des capteurs.

La figure 3-26 présente le panneau principal de l'application du logiciel AMS [18]. Au milieu, on peut apercevoir le plan de la base de données (Plant Database). AMS est un outil de configuration et de gestion d'un parc de capteurs. Une représentation de l'équipement est faite par un icône. L'identification de l'équipement s'effectue par pointage de la souris avec affichage du nom de repère du capteur. L'affectation des capteurs à la base de données est représentée suivant une arborescence que l'on peut découper par situation géographique.

La partie gauche de cet écran montre l'utilisation du terminal de communication Hart qui permet la programmation et la modification de la configuration des capteurs sur l'installation. Une liaison s'établit entre le logiciel AMS et le terminal de communication Hart par la connexion de ce terminal au port RS232 du PC. Une configuration complète ou partielle est utilisée par le terminal Hart.

Dans un premier temps, j'ai chargé la description des 60 capteurs de pression de l'installation dans le terminal Hart. Dans un second temps, j'ai sauvegardé la configuration des capteurs dans la base de donnée de AMS. Ensuite, j'ai modifié la gamme de mesure de

certaines capteurs, afin que la sortie analogique du capteur soit à l'échelle. Une fois que ces nouveaux paramètres ont été enregistrés dans la base de données, j'ai effectué un chargement du terminal, puis restitué la configuration dans le capteur.

Après une comparaison des informations de configuration des capteurs stockées dans le terminal de communication Hart et le logiciel AMS est possible de vérifier la correspondance des paramètres.

A droite de la figure 3-26 nous pouvons observer la connexion au réseau ALSTOM de la DI80 et les capteurs reliés à celle-ci. Nous disposons des mêmes fonctionnalités de sauvegarde, modification et de chargement de la configuration des capteurs entre la DI80 et la base de données. Par contre les échanges des informations se font ici, directement sans avoir à passer par le terminal de communication Hart. Cela permet une gestion plus souple et rapide du parc de capteurs, à distance et sur des installations éloignées.

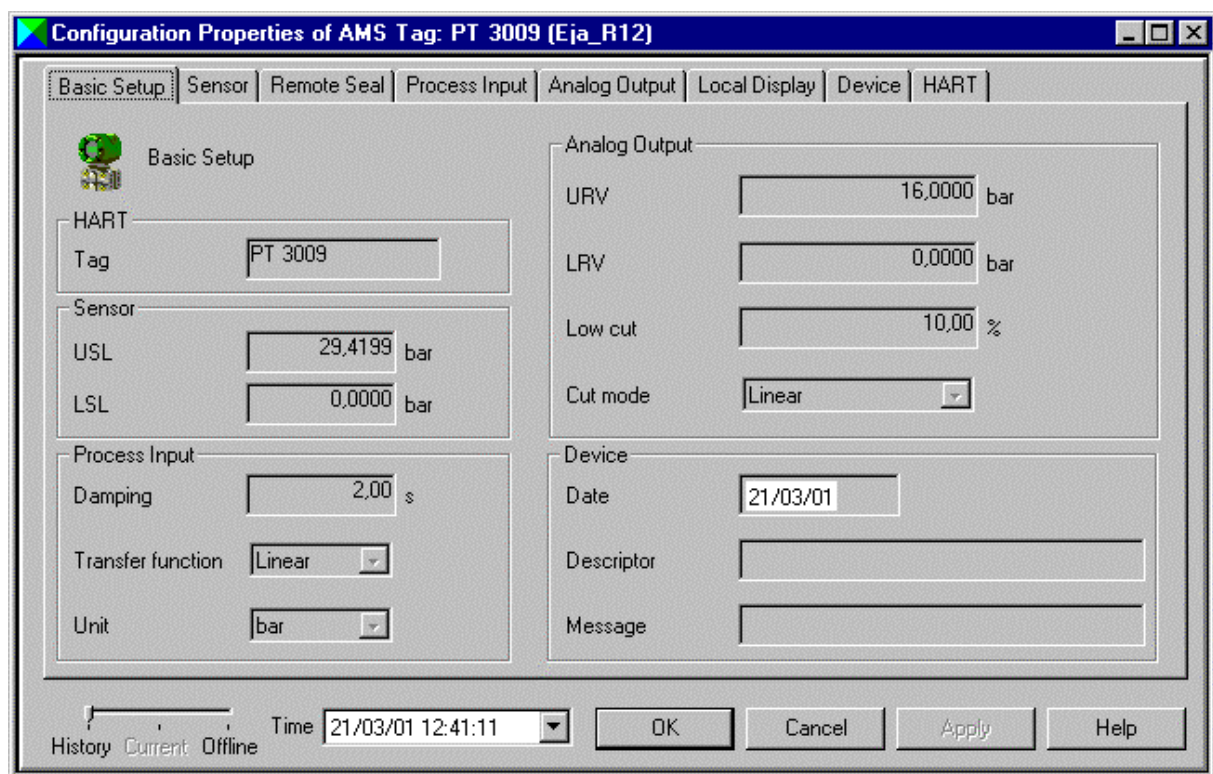


Figure 3-27 : Panneau de configuration des propriétés d'un capteur de AMS.

Les figures 3-27 et 3-28 sont un exemple de panneau de configuration d'un capteur de pression PT3009. On trouve le nom du capteur, les échelles min et max pour la sortie analogique, les valeurs de dépassement du capteur, l'unité en bar, et la date.

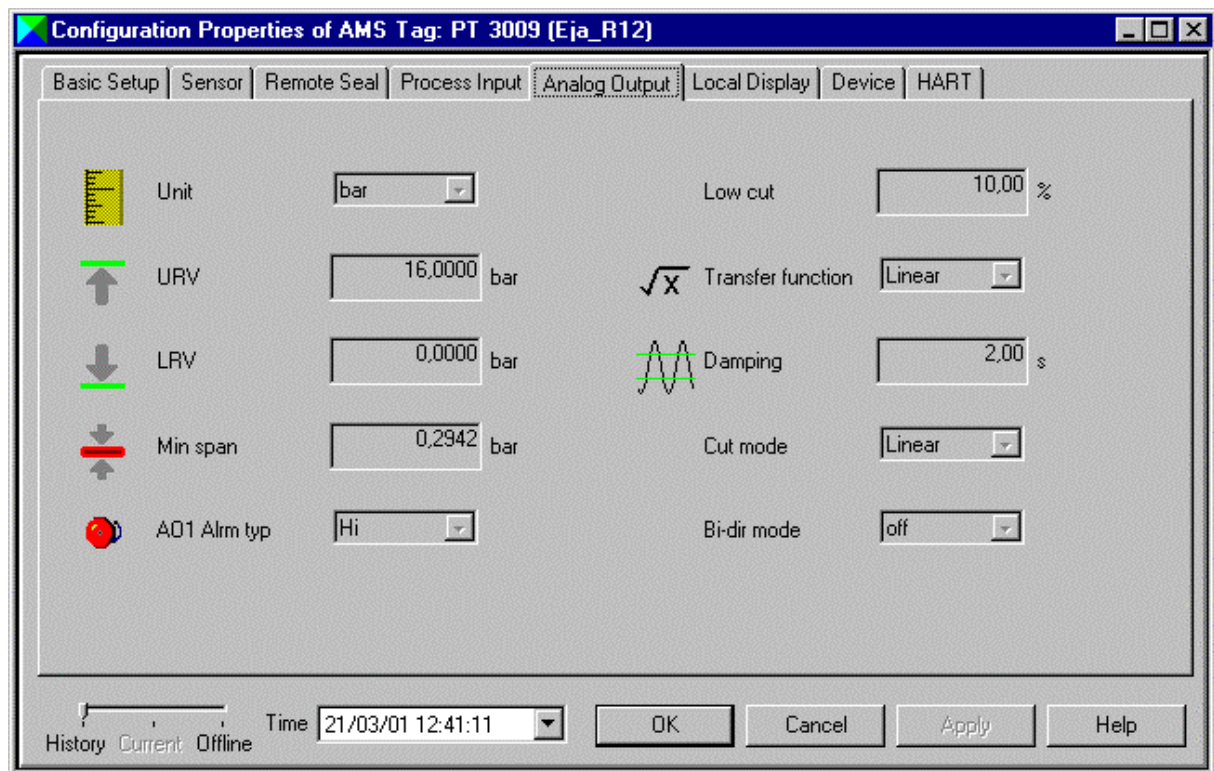


Figure 3-28 : Panneau de configuration des propriétés d'un capteur de AMS.

Le capteur intelligent.

Le capteur intelligent correspond principalement à l'intégration dans le corps du capteur d'un organe de calcul interne (microprocesseur, micro-contrôleur), d'un système de conditionnement du signal (programmable ou contrôlé) et d'une interface de communication.

Les capteurs intelligents sont des dispositifs capables de détecter, de mesurer, de traduire, de dater et de traiter les données collectées en vue de les communiquer à d'autres organes du système dans lequel ils sont intégrés. Ils permettent, à travers différents traitements "informatiques" locaux, l'amélioration des performances métrologiques (validité des informations transmises, exactitude et crédibilisation renforcée des mesures, informations de haut niveau ...), la diminution des points de mesure et une communication de manière bidirectionnelle. Ils intègrent également des fonctions d'auto-diagnostic, d'auto-calibration, et de gestion de l'historique. De ce fait, les capteurs intelligents permettent d'accroître et d'améliorer la surveillance et le contrôle d'un environnement donné et donc la disponibilité et la sécurité des systèmes dans lesquels ils sont intégrés.

3.5. Supervision (utilisation de la technologie Internet).

Le poste de conduite a pour rôle principal d'offrir une interface graphique homme/machine dans le cadre du système de contrôle commande. (voir exemple figure 3-29)

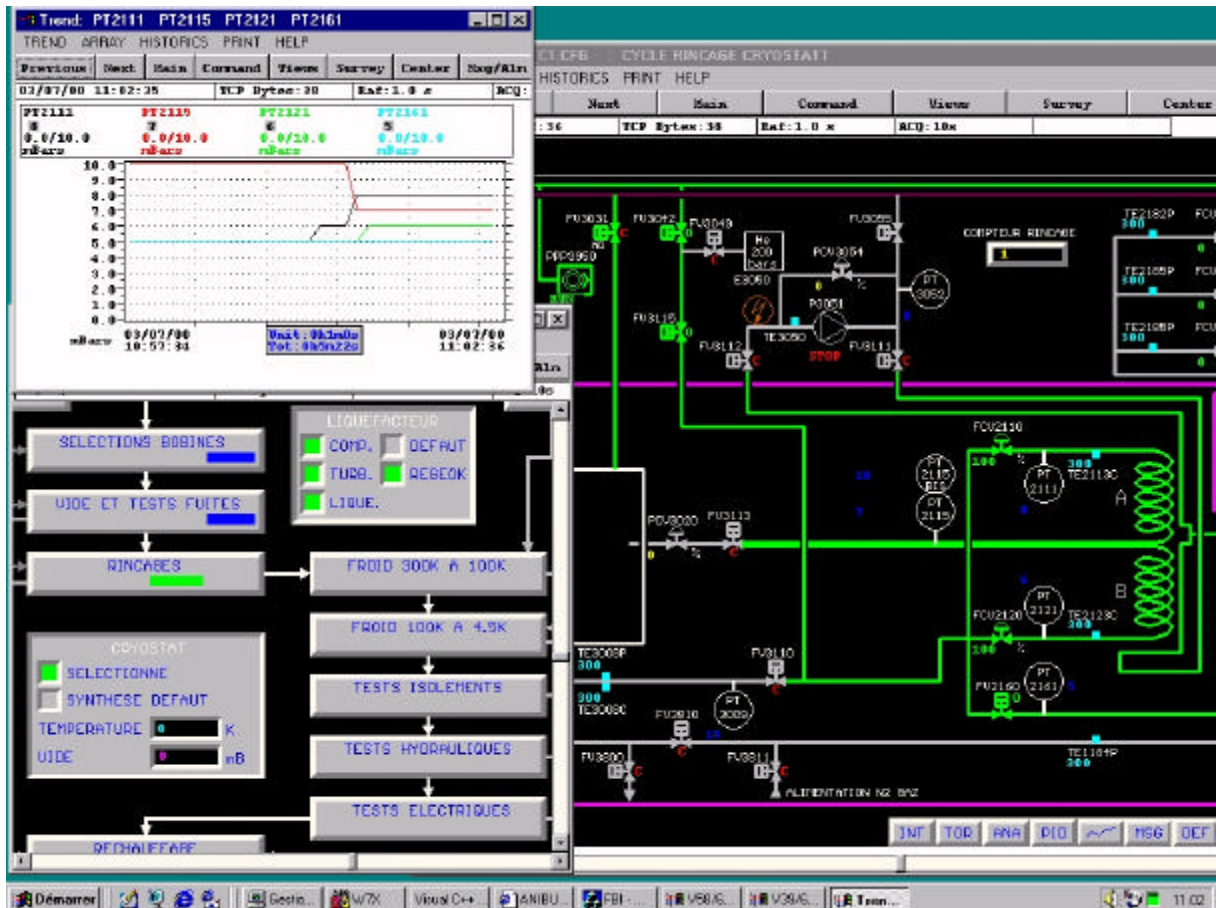


Figure 3-29 : Vues du poste de supervision.

Il est constitué d'images de fond statiques, réalisées au format PCX provenant soit d'un logiciel de dessin (DAO) Autocad soit d'une photo couleur scanner.

Ces images sont animées par incrustation et commutation de couleurs suivant :

?? Les variables digitales avec lesquelles on associe un mot pré-défini de 8 caractères apparaissant sur l'image de fond. Ce mot correspond à une liste standard de 24 mots clefs couramment utilisés (actif-repos-marche-arrêt-oui-non-ouvert-fermé etc....)

?? Les variables analogiques disponibles sous 4 formes : numérique, courbe de tendance, bargraphe ou curseur.

Le pilotage des variables analogiques et logiques est possible afin de permettre le paramétrage en ligne de l'application.

Le poste de conduite est aussi un système d'acquisition avec plusieurs modes de fonctionnement :

?? Le logiciel stocke sur le disque dur de l'ordinateur à une période standard l'ensemble de tous ces paramètres pendant une semaine. (Période standard 30s ou rapide 3s). L'acquisition à la semaine s'effectue de façon tournante, assurant ainsi l'historique sur 7 jours de toutes les variables. Un fichier d'acquisition globale est créé par heure pour chaque jour de la semaine.

?? Le logiciel peut archiver sur de très longues durées, des variables pré-définies suivant une période déterminée. Un fichier d'acquisition est associé au libellé de cette variable.

Le poste de conduite permet l'historique graphique de toutes les images sur l'ensemble des données d'une semaine. Il est possible de revoir l'acquisition, pas à pas, pour analyser les événements antérieurs.

Le poste de conduite permet l'édition d'alarmes horodatées sur l'imprimante par le déclenchement de seuils analogiques ou par changement d'état d'une variable logique.

Il y a également une visualisation de l'installation à distance pour la surveillance et le diagnostic de panne.

Enfin tous les paramètres archivés sur le disque dur provenant de l'acquisition, sont convertibles au format CSV de Microsoft Excel.

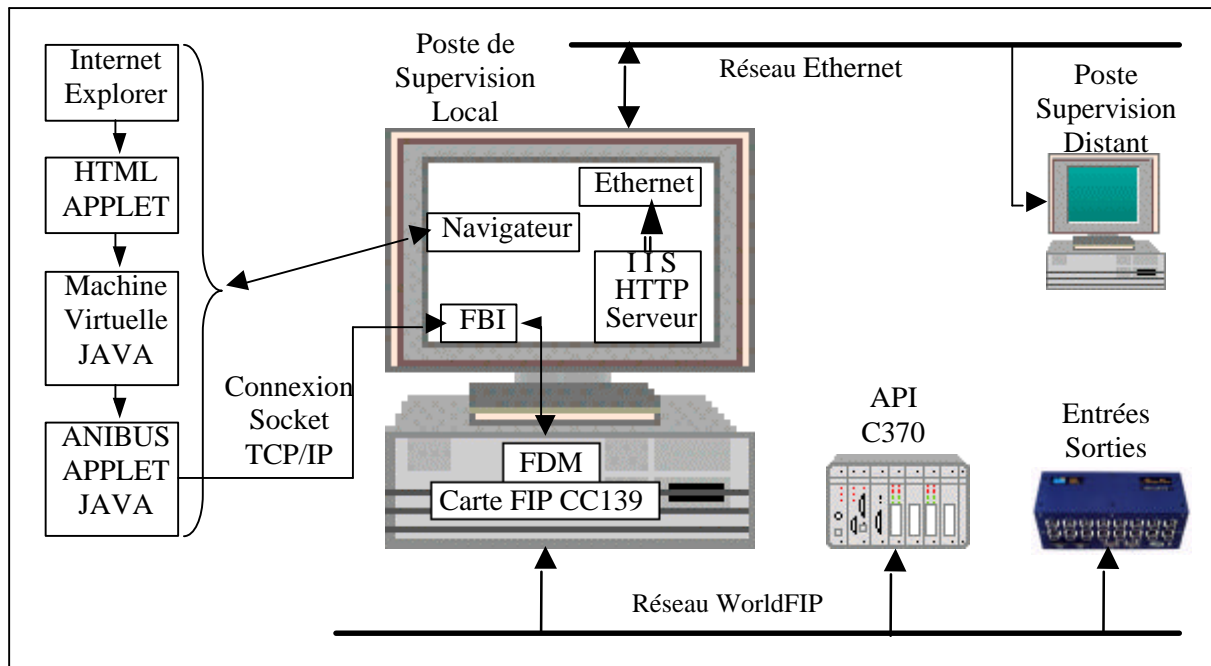


Figure 3-30 : Principe de fonctionnement du poste de supervision.

La figure 3-30 donne l'explication du principe de fonctionnement du poste de supervision avec l'utilisation de la technologie Internet.

Internet Explorer appelle une page HTML¹ qui contient les instructions de base permettent de charger une APPLLET JAVA du logiciel d'animation ANIBUS. Cette APPLLET s'exécute dans la machine virtuelle JAVA de Microsoft et établit une connexion par socket TCP/IP avec le serveur de donnée FBI (Field Bus Internet). Ce serveur FBI est un service de Windows NT. FBI s'appuie sur la librairie FDM (Fip Device Manager) et le driver FIP pour Windows NT.

On a associé, à l'application ANIBUS, un serveur HTTP² I.I.S. (Internet Information Serveur) installé sous l'environnement de Windows NT. Le rôle de ce serveur est de chercher la page HTML contenant l'APPLLET JAVA d'ANIBUS pour la fournir au poste client de supervision distant. Le poste distant va faire appel à travers HTTP.

Le poste de supervision client n'est pas gourmand en mémoire. Il utilise simplement le navigateur Internet Explorer de n'importe quel site. Le client n'a pas besoin de logiciel résidant sur la machine. La mise à jour de l'APPLLET est centralisée sur le serveur, ce qui simplifie le traitement et la maintenance exclusivement au serveur. Le poste client est automatiquement actualisé.

¹ HTML = Hyper Text Markup Language.

² HTTP = Hyper Text Transmission Protocol.

La perspective de serveur Web embarqué à travers le poste de supervision.

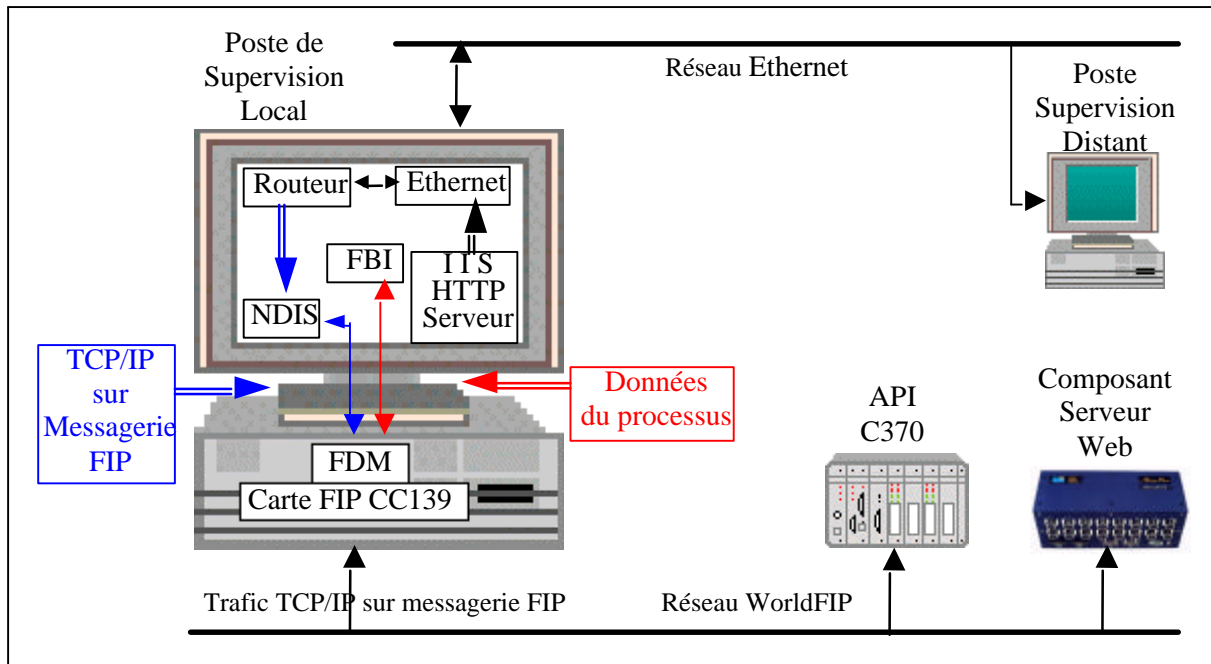


Figure 3-31 : Serveur Web embarqué.

La figure 3-31 montre le principe de serveur embarqué. Le poste de supervision distant recevra à travers le réseau Ethernet les pages HTML de l'Interface / Homme / Machine qui seront incorporées dans le composant intégrant un serveur Web raccordé sur le réseau FIP. Les pages seront acheminées au format TCP/IP sur la messagerie aperiodique de FIP qui s'intercale dans le trafic deterministe.

Le serveur FBI gere les variables periodiques du processus pour le poste de supervision local.

Chapitre 4

RÉSULTATS

4. Résultats.

4.1. Introduction.

Etant responsable sous-système pour mon service du projet W7X, j'ai eu un travail conséquent à réaliser en parallèle avec ces travaux qui tendrait à m'intéresser ici à l'ensemble de l'installation.

Mais l'installation W7X ayant pris un retard important au moment de la rédaction de mon mémoire, mes résultats porteront plus sur le bilan des sous-ensembles fonctionnels que sur l'installation proprement dite.

J'expose en détail dans ce chapitre :

- ?? La validation des concepts de programmation et supervision via la première descente en vide de l'installation.
- ?? La validation de notre maîtrise du réseau de terrain WorldFIP.
- ?? L'état d'avancement et les attentes du coupleur déporté FIP/Modbus.
- ?? La validation de la passerelle FIP/HART.
- ?? La validation des sondes Cernox sur la CABTF.
- ?? Le bilan des vérifications et étalonnages des voies de mesures à ce jour.
- ?? L'estimation du temps de chargement restant sur le réseau WorldFIP pour la messagerie.

4.2. Processus cryogénique.

La figure 4-1 illustre la première descente en vide du cryostat 1.

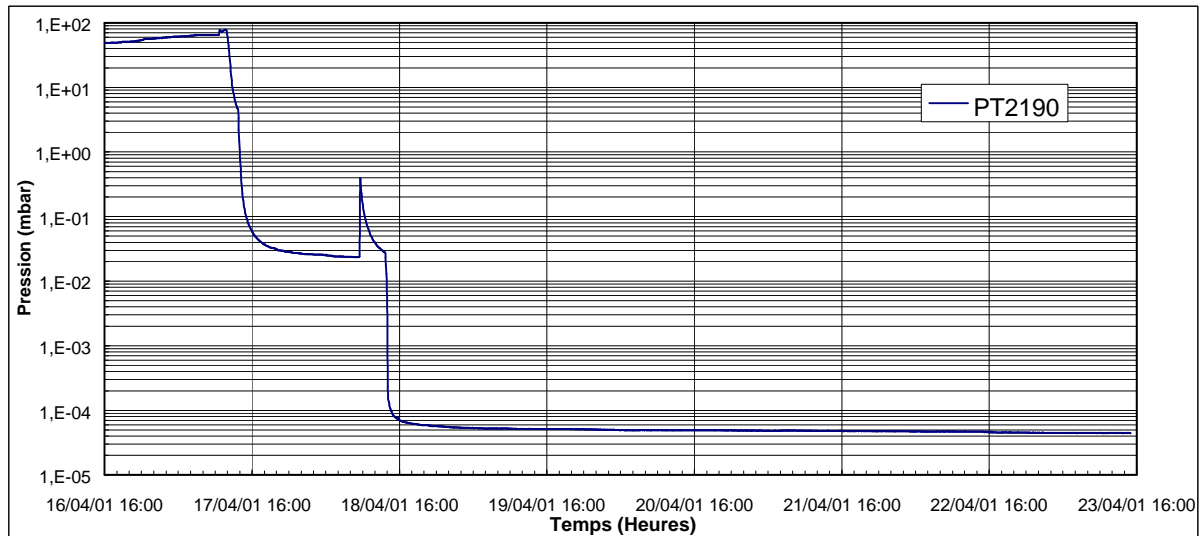


Figure 4-1 : Descente en vide du cryostat 1.

Nous obtenons un vide de $4,5 \cdot 10^{-5}$ mbars au bout de 5 jours.

La photo figure 4-2 page suivante montre en premier plan le poste de supervision et en second plan les baies de l'automate et borniers de raccordement de l'installation W7X.

La photo figure 4-3 page suivante illustre la dimension des cryostats dans hall.



Figure 4-2 : Photo des baies.



Figure 4-3 : Photo du hall avec les cryostats.

4.3. Réseau WorldFIP.

La figure 4-4 montre une vue du réseau WorldFIP à l'oscilloscope.

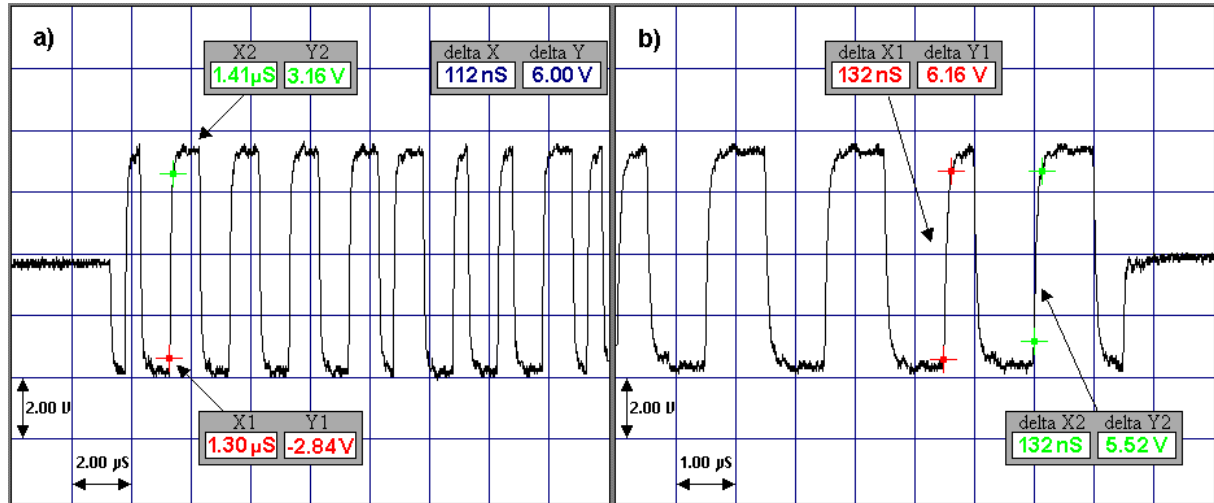


Figure 4-4 : Les cycles de début et de fin d'une trame.

La figure 4-4a présente les cycles de début d'une trame précisant les fronts de montée des impulsions. L'amplitude moyenne des impulsions est de 6.00 V.

La figure 4-4b présente les cycles de fin d'une trame. L'amplitude moyenne des impulsions est de 6.16 V.

On voit que les cycles de début et de fin de trame de la figure 4-2 correspondent bien au format de la trame WorldFIP figure 4-5.

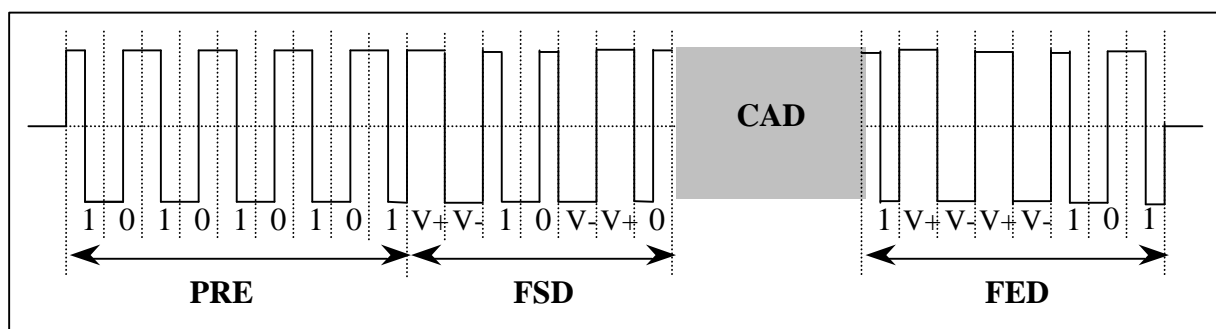


Figure 4-5 : Format de la trame WorldFIP.

- où PRE = Préambule,
- FSD = Frame Start Delimiter : Délimiteur de début de trame,
- CAD = Control And Data : Contrôle et données,
- FED = Frame End Delimiter : Délimiteur de fin de trame.

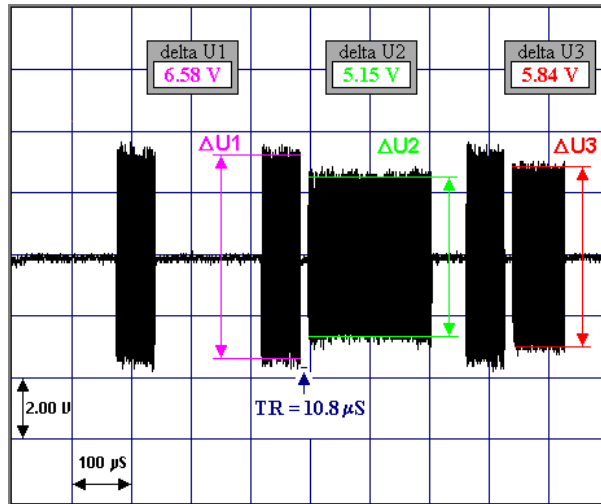


Figure 4-6 : Une série de trame FIP.

La figure 4-6 présente une série de trames de communication entre l'Arbitre de Bus et un appareil. La trame de question ID_DAT a une amplitude $\Delta U1$ de 6.58 V. Les trames de réponse RD_DAT sont respectivement de $\Delta U2 = 5.15$ V et $\Delta U3 = 5.84$ V. Ces différences d'amplitudes sont dues simplement à une atténuation du signal, suite à l'éloignement de l'abonné concerné sur le réseau. Ici, la mesure a été faite près de l'arbitre de bus, c'est pourquoi la question ID_DAT a la plus forte amplitude.

On peut constater que le temps de retournement TR est de 10.8 μs.

Ci-après voici un exemple de trames WorldFIP capturées par un scanner pour réseau FIP. Tous les chiffres sont exprimés en base Hexadécimale.

N = Nombre de capture, L = longueur, DT = Temps relatif, T = Temps absolu.

N=00041 L=003 ID_DAT DT= 0.06ms T= 10.37ms
05 1E

N=00042 L=020 RP_DAT DT= 0.26ms T= 10.62ms
40 11 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 05

Cette trame avec identificateur "05 1E" correspond à la variable "APC_OUTSA1" d'écriture des sorties de l'îlot pneumatique du satellite. Ici, toutes les électrovannes sont commandées à 0. Dans la réponse "40 11" le 1^{er} octet 40 correspond au type de donnée utilisateur et le 2^{ème} octet correspond à la longueur des données de la trame. Le dernier octet de la trame est le status.

N=00043 L=003 ID_DAT DT= 0.13ms T= 10.75ms
04 2B

N=00044 L=040 RP_DAT DT= 0.38ms T= 11.14ms
40 25 00 FF FF FF 00 00 C8 42 00 00 C8 42 00 00 C8 42 00 00
C8 42 00 00 C8 42 00 00 C8 42 00 00 C8 42 00 00 C8 42 CD

Cette trame avec identificateur "04 2B" correspond à la variable "T_CABT1_C2" de mesure de la carte 0 du CABTF du cryostat 2. Ici, toutes les sondes de température sont en défaut.

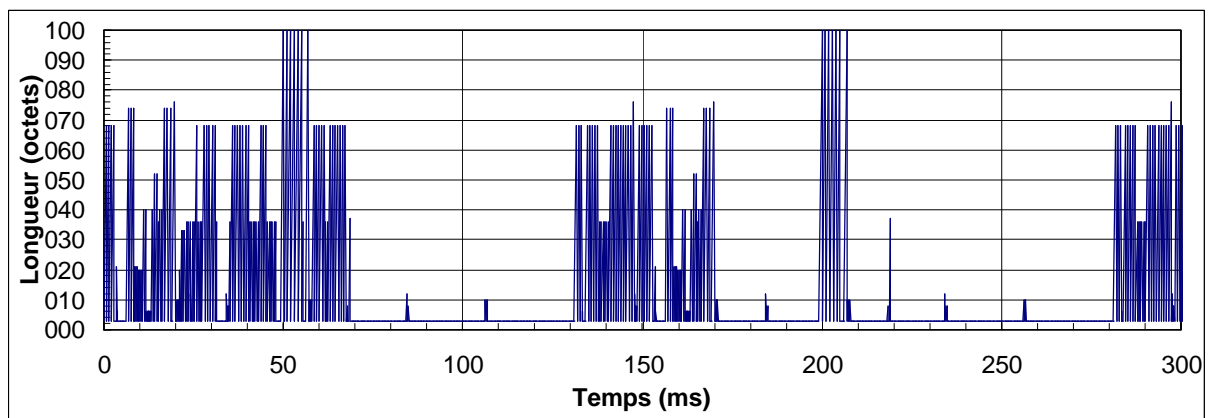


Figure 4-7 : Chronogramme du réseau FIP.

La figure 4-6 donne le chronogramme du réseau FIP. On voit bien la charge du réseau et le temps libre restants ; ce qui confirme les 50% de disponibilité pour faire de la messagerie TCP/IP. Nous avons donc 45 koctets/s d'information utile disponible.

4.4. Coupleur déporté FIP/MODBUS.

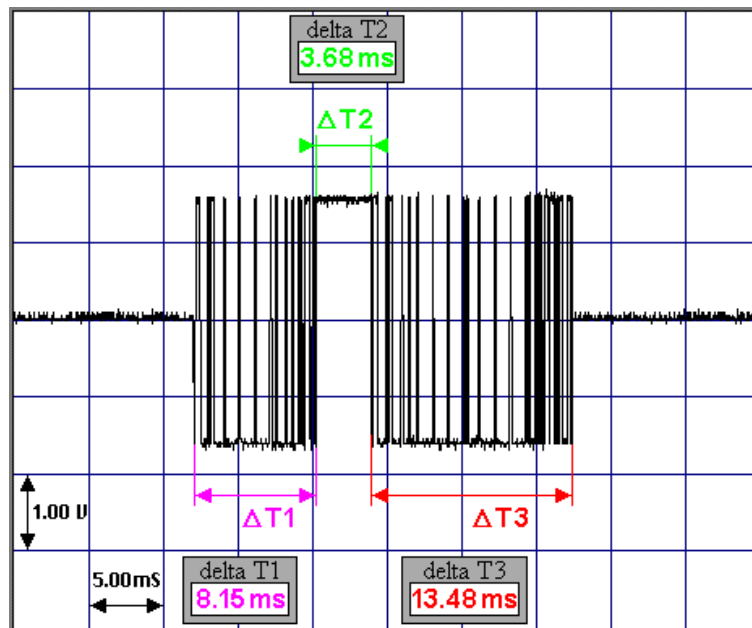


Figure 4-8 : Vue à l'oscilloscope d'une requête MODBUS

La figure 4-8 représente la prise de vue à l'oscilloscope d'une requête MODBUS de lecture 4 mots de l'alimentation 25 kA. La somme des temps $\Delta T1 + \Delta T2 + \Delta T3 = 25,31$ ms trouvée sur cette figure confirme le temps de 25,88 ms calculé dans le tableau 3-5 du chapitre 3.4.2.1. pour la même requête.

Le travail confié aux informaticiens n'est pas encore terminé, des difficultés se sont avérées sur la programmation du boîtier MICROBOX.

c) Troisième étape :

Cette troisième étape permet à l'Arbitre de Bus de reprendre le contrôle du bus.

N=04548 L=001 RP_FIN DT= 0.06ms T=1150.45ms

La carte CC121 après avoir envoyé son message sur le bus, émet une trame RP_FIN.

La couche liaison de données de FIP offre également des services de transfert de messages avec acquittement, permettant de fiabiliser des échanges en point à point.

Le principe de fonctionnement est à peu près identique à un service non acquitté en ce qui concerne les deux premières étapes. Ici l'émetteur (DI80) du message répond avec une trame RP_MSG_ACK au lieu d'une trame RP_MSG_NOACK. L'échange se fait en point à point.

a) Première étape : Identique

Demande de message de la DI80.

N=05150 L=003 ID_DAT DT= 0.26ms T=1299.50ms
00 02

N=05151 L=020 RP_DAT_MSG DT= 0.26ms T=1299.76ms
40 11 0E 00 00 00 03 FE 21 00 3F 80 00 00 00 00 00 05

b) Seconde étape : Identique

Emission du message par la trame RP_MSG_ACK.

N=05336 L=003 ID_MSG DT= 0.13ms T=1349.62ms
00 02

N=05337 L=041 RP_MSG_ACK DT= 0.38ms T=1350.00ms
01 03 00 01 02 00 08 00 45 00 00 20 00 07 00 00 0F 11 FF AD
6F DE 21 02 6F DE 21 03 1D 4C 1D 83 00 0C C2 E1 6F DE 21 02

b) Troisième étape :

Le destinataire (la carte CC121) du message répond par une trame d'acquiescement RP_ACK+, l'émetteur (la DI80) signale ensuite la fin de transaction message à l'Arbitre de Bus par une trame RP_FIN.

N=05338 L=001 RP_ACK+ DT= 0.06ms T=1350.06ms

N=05339 L=001 RP_FIN DT= 0.06ms T=1350.13ms

Les avantages de passerelle FIP/HART sont la souplesse de configuration d'un capteur et la gestion à distance des capteurs.

Les inconvénients de passerelle FIP/HART est le coût de revient. Cette architecture composée d'un seul dispositif s'est élevée à 100 MF. Je pense que cela vient du fait que nous avons été un des premiers à l'utiliser. Pour que l'investissement devienne rentable, il faudrait avoir un parc de 1000 capteurs, comme par exemple sur les installations de raffinerie de pétrole.

La configuration de tous les capteurs de pression s'est bien passée, ainsi que l'archivage sur le logiciel AMS.

4.6. CABTF.

Chaque voie a été simulée par une boîte à résistance, afin de vérifier que les coefficients chargés dans les CABTF étaient corrects. L'essai a été concluant et la valeur lue sur le poste de supervision est correcte.

A ce jour, les voies de mesures pour le satellite, la boîte à vannes 1 et le cryostat 1 sont vérifiées et étalonnées.

4.7. Supervision.

Le raisonnement qui suit reprend le résultat et l'estimation du temps de chargement restant sur le réseau WorldFIP pour la messagerie.

Comme le temps de référence est le Macro-Cycle de 300 ms, la démonstration dans le chapitre 3, montre qu'il reste ~ 50 % de charge réseau de débits utile pour faire de la messagerie avec le protocole TCP/IP ~150 ms.

Cela correspond à : ~ 500 kbits/s de transfert de données.

Ramené à : ~ 50 koctets/s

Nous enlevons : -10% d'encapsulation TCP/IP

Il reste : 45 koctets/s d'information utile.

Par comparaison le code Anibus JAVA est de 300 koctets. On estime, par exemple, la taille du code d'Interface / Homme / Machine à charger dans la CABTF estimée 150 koctets, donc le temps de chargement de l'interface sera de 3 secondes.

CONCLUSION

Conclusion

Pour conclure et donner une vue globale de l'ensemble du travail qui a été réalisé, je dois dire qu'en mai 2001 l'installation est à 95% terminée et à 50% testée et opérationnelle.

Nous sommes donc déjà en mesure d'accueillir la première bobine de test dans le cryostat numéro 1 pour valider notre installation.

Il faut noter que sur un travail de deux années, la gestion en tant que chargé d'affaire de l'instrumentation a été particulièrement prenante car cette installation est conséquente (1060 éléments) et que nous avons dû relever un grand nombre de défis technologiques.

Je rappellerais qu'à ce titre, je suis responsable de l'organisation, des moyens et de l'état d'avancement du sous projet Instrumentation et Electrotechnique pour le compte du Service d'Instrumentation Générale. J'estime, sur les deux années écoulées, avoir accordé 60% de mon temps à cette fonction.

Pour le travail d'expert qui m'a été confié et pour les défis qui me concernaient, le fait que nous soyons en mesure d'effectuer les premiers tests est le meilleur bilan positif que je puisse exprimer.

La première mise en service du contrôle commande a déjà donné toute satisfaction pour les tests sous vide du premier cryostat.

Les nouveaux capteurs au standard Hart communiquent parfaitement avec le reste de l'installation via le réseau de terrain WorldFIP.

D'une manière générale nos diverses chaînes de mesures, capteurs et actionneurs sont tous opérationnels dans les domaines de sensibilité et de rapidité qui nous étaient fixés dans le cahier des charges de départ.

Je me suis beaucoup investi dans les programmes innovants de communication FIP/HART et FIP/MODBUS, au point de savoir analyser et comprendre au plus bas niveau les trames de communication du réseau de terrain, tant les enjeux en terme d'optimisation deviennent importants.

L'utilisation et l'optimisation du réseau de terrain WorldFIP sont indispensables pour nous permettre de découpler les couches contrôle commande, supervision et matériel. C'est ainsi que nous avons une chance de pouvoir maintenir plus durablement nos installations en

séparant ces éléments qui par le jeu de l'économie de marché deviennent de moins en moins pérennes.

Dans la même stratégie l'avenir nous poussera, sans doute, à étudier la faisabilité d'une machine frontale qui fasse la passerelle entre le monde des acquisitions rapides et le monde des automates. Ainsi, nous devrions simplifier notre répartition des mesures qui, pour le moment, sont encore dupliquées pour satisfaire aux deux environnements.

De même, les solutions du réseau de terrain WorldFIP nous pousserons également à revoir notre philosophie centralisatrice au niveau du serveur de supervision en déportant l'Interface / Homme / Machine au plus bas niveau avec l'intégration de serveur Web dans les composants d'automatisme évolués.

Bibliographie

- [1] Bus FIP : Architecture et présentation générale. - Norme NF C 46-601
- Union Technique de l'Électricité 1990.
- [2] Bus FIP : Couche application - Services périodiques et aperiodiques.
- Norme NF C 46-602 - UTE 1990.
- [3] Bus FIP : Couche liaison de données. - Norme NF C 46-603 - UTE 1990.
- [4] Bus FIP : Couche physique en bande de base sur paire torsadée blindée.
- Norme NF C 46-604 - UTE 1993.
- [5] Bus FIP : Gestion réseau. - Norme NF C 46-605 - UTE 1990.
- [6] Bus FIP : Couche application - Services de messagerie.
- Norme NF C 46-606 - UTE 1990.
- [7] Bus FIP : Couche physique en bande de base sur fibre optique.
- Norme NF C 46-607 - UTE 1993.

- [8] G. FAGES : "Les bus de terrain." - Collection technique - Groupe Schneider - 1996.

- [9] Ph. LETERRIER : "Le protocole FIP" - Responsable développement
- Centre de Compétence FIP - Nancy.

- [10] CETIM : "Les réseaux de terrain par la pratique." - Journée d'information
- Centre Technique des Industries Mécanique - Saint-Etienne - 17/12/1996.

- [11] CETIM - J.C. BOEHM : "Réseaux de terrain - Réseaux de capteurs / actionneurs
- Comment ça marche ? - Qu'en attendre ?"
- Saint-Etienne (Tome 2, Tome 3) 4/11/1997.

- [12] Ch. WALTER : "Réunion annuelle" - Club WorldFIP CEA - janvier 2001.

- [13] APRIL : "PB 200 , PB 400 Coupleur JBUS" - Réf : F.4070 - 1986.

- [14] ALSTOM : "Manuel utilisateur du concentrateur d'E/S Alspa CE80-35."
- ALS 52313 b-fr - 1998.

- [15] ALSTOM : "Alspa DI80 Version 2 - User Reference Manual."
- ALS 53323 a-en - 2000.
- [16] ROMILLY BOWDEN : "The HARTtm Protocol - A Technical Description."
- Rosemount AG - 1991.
- [17] RONALD B. HELSON : "The HART² Protocol - A Solution Enabling Technology."
- HART Communication Foundation - 1999.
- [18] AMS : Logiciel Asset Management Solutions. - Version 1.4.1 - Fisher-Rosemount
Systems, Inc - 1996 , 1999.
- [19] P. DES CLOSIERES : "Actionneur et transmetteur intelligents pour réseau de terrain"
- Mémoire CNAM TH 8590 - 1996.
- [20] D. BOMBRUN : "Etude et conception d'un didacticiel sur le réseau de terrain
WorldFIP" - Mémoire CNAM - TH7473 - 1997.