



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MASTER 2 TITRE INGENIEUR

Mention : ELECTRONIQUE

Option : Informatique Appliquée

**TRAITEMENT NUMERIQUE DE
SIGNAL DU SONDEUR
MULTIFAISCEAUX
« SoftEye_2 » PAR
UTILISATION D'UN CIRCUIT
FPGA**

Présenté par :

ANDRIANJAFY Antsa Arivony Vatosoa

Numéro d'ordre : 09/EN/M2/IA/2013

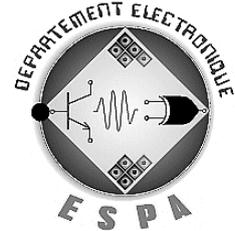
Soutenu le 01 Juillet 2015

Année Universitaire : 2013-2014



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MASTER 2 TITRE INGENIEUR

Mention : ELECTRONIQUE

Option : Informatique Appliquée

TRAITEMENT NUMERIQUE DE SIGNAL DU
SONDEUR MULTIFAISCEAUX « SoftEye_ 2 » PAR
UTILISATION D'UN CIRCUIT FPGA

Présenté par :

ANDRIANJAFY Antsa Arivony Vatosoa

Soutenu le 01 Juillet 2015

Devant les membres de Jury composé de :

- Mr RAKOTOMIRAHO Soloniaina, Président
- Mr RATSIMBAZAFY Guy Predon Claude, Examineur
- Mr RABESANDRATANA Andriamihaja Mamisoa, Examineur
- Mr ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson, Examineur

Encadré par :

Mme RAMANANTSIHOARANA Harisoa Nathalie

Année Universitaire : 2013-2014

REMERCIEMENTS

Au terme de la rédaction de ce présent ouvrage, je rends grâce à notre Seigneur et Sauveur Jésus Christ de m'avoir donné la vie, la santé, le courage et la joie durant ces cinq dernières années passées au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, et aussi par sa grâce infinie que ce présent travail a vu le jour.

Je remercie Monsieur ANDRIANARY Philippe, Directeur de l'ESPA, de m'avoir accueillie au sein de son établissement.

Je veux présenter mes remerciements à Monsieur RATSIMBA Mamy Nirina, Chef du Département Electronique, qui a consacré ses efforts pour le bon déroulement de ma formation au sein du département.

J'exprime mes profondes gratitude à mon Encadreur de mémoire, Madame RAMANANTSIHOARANA Harisoa Nathalie, de m'avoir dirigé tout au long de ce travail, et qui n'a cessé de me prodiguer des précieux conseils.

Je tiens aussi à remercier Monsieur RAKOTOMIRAHO Soloniaina, qui m'a fait l'honneur de présider les membres de Jury de ce mémoire, ainsi que tous les membres de Jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps, pour examiner et améliorer l'ensemble de ce travail.

- *Monsieur RATSIMBAZAFY Guy Predon Claude*
- *Monsieur RABESANDRATANA Andriamihaja Mamisoa*
- *Monsieur ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson*

Une appréciation distinguée à toute l'équipe pédagogique du Département Electronique de l'ESPA qui a fourni généreusement les bases de mes connaissances durant ces cinq années et aussi pendant l'élaboration de ce mémoire.

Je saisis cette occasion pour exprimer également mes vifs remerciements à ma famille qui m'a soutenu moralement, matériellement et financièrement, et m'a encouragé durant mes études. C'est aussi un agréable devoir de témoigner ma reconnaissance envers mes amis, mes collègues, mes frères et sœurs en Christ, ainsi que tous ce qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce présent mémoire.

Que Dieu Tout Puissant vous bénisse.

RESUME

Les sondeurs multifaisceaux ont l'intéressante capacité d'établir une carte bathymétrique, qui est très utile dans de nombreux domaines scientifiques. Son principe de fonctionnement est basé sur la méthode d'émission d'un signal acoustique par un transducteur, et le signal réfléchi par le fond est reçu par d'autre type de transducteurs. L'objectif de ce mémoire est fondé sur le traitement de signal issu d'un sondeur multifaisceaux, par utilisation du circuit programmable FPGA (Field Programmable Gate Array) comme support pour l'implémentation du processus de traitement et de contrôle des flux de données, afin d'obtenir des mesures de la profondeur de la surface immergée.

Le projet sondeur multifaisceaux bathymétrique « SoftEye_2 », réalisé à l'échelle laboratoire, tout en gardant le même principe et structure à l'échelle industrielle, a été élaboré. Il est indispensable de préciser qu'il y avait déjà un projet « SoftEye_1 », par contre, nous apportons des améliorations sur les méthodes de détection, les qualités de sondes utilisées, et le traitement des données reçus. Le processus de fonctionnement de « SoftEye_2 » se résume par : la génération du signal à émettre, le traitement du signal reçu pour parvenir à l'établissement d'une carte représentant la mesure bathymétrique de la zone étudiée.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
RESUME.....	ii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I :	
GENERALITES SUR LA BATHYMETRIE, LES ONDES ACOUSTIQUES, LES SONDEURS MONOFAISCEAUX ET MULTIFAISCEAUX	2
1.1- NOTION SUR LA BATHYMETRIE.....	2
1.2- ONDE ACOUSTIQUE SOUS- MARINE.....	3
1.2.1- Equation des ondes, intensité et puissance reçue	3
1.2.2- Perte de propagation de l'onde acoustique	4
1.2.3- Vitesse du son et profil de célérité dans l'eau	5
1.2.4- Longueur d'onde et fréquence acoustique.....	8
1.3- LES SONDEURS ACOUSTIQUES	9
1.3.1- Sondeur monofaisceau.....	9
1.3.2- Sondeurs multifaisceaux.....	10
1.4- CONCLUSION	16
CHAPITRE II :	
LE TRAITEMENT NUMERIQUE DE SIGNAL (TNS) ET LE CIRCUIT LOGIQUE PROGRAMMABLE FPGA	17
2.1- LE TRAITEMENT NUMERIQUE DE SIGNAL ou DIGITAL SIGNAL PROCESSING (DSP)	17
2.1.1- Généralités sur le DSP.....	17

2.1.2-	Traitement numérique des données issues des sondeurs multifaisceaux.....	25
2.2-	GENERALITES SUR LES CIRCUITS FPGAs	27
2.2.1-	Les composants dans la carte FPGA	27
2.2.2-	Architecture des FPGAs	28
2.2.3-	Configuration et reconfiguration des FPGAs	29
2.2.4-	Les principaux atouts et applications de la technologie FPGA	30
2.3-	CONCLUSION	31
CHAPITRE III :		
	SPECIFICATION TECHNIQUE DU PROJET « SoftEye_2 ».....	32
3.1-	SYNOPTIQUE DU PROJET.....	32
3.2-	TRANSDUCTEURS ET ANTENNES DU SMF de « SoftEye_2 »	33
3.3-	CARACTERISTIQUES DU SMF « SoftEye_2 »	35
3.4-	GENERATION DU SIGNAL A EMETTRE	35
3.5-	RECEPTION DES ECHOS	37
3.5.1-	Interprétation des échos.....	37
3.5.2-	Différence de chemin d'accès et temps supplémentaires lors de la réception de l'écho ...	40
3.6-	AMPLIFICATION DU SIGNAL	40
3.7-	FILTRE ANTI-REPLIEMENT.....	41
3.8-	CONFIGURATION DU MODULE ADC - récepteur	41
3.9-	TRAITEMENT DU SIGNAL NUMERIQUE.....	42
3.9.1-	Multiplexage de la directivité.....	42
3.9.2-	Compensation des mouvements du porteur face aux vagues	45
3.9.3-	Calcul de la profondeur	46
3.10-	CONCLUSION	47
CHAPITRE IV :		
	REALISATION DU PROJET « SoftEye_2 ».....	48
4.1-	PRESENTATION DU SYSTEME D'ACQUISITION	49

4.1.1-	Le système de propulsion	50
4.1.2-	Les antennes du SMF « SoftEye_2 ».....	52
4.1.3-	La carte d'acquisition	53
4.1.4-	La carte SmartFusion Evaluation Kit A2F-EVAL-KIT-2 de ACTEL	54
4.1.5-	Coût du projet.....	55
4.2-	IMPLEMENTATION LOGICIEL	55
4.2.1-	Logiciel de développement Libero SoC 11.5 (System On Chip) et SoftConsole v3.4.....	55
4.2.2-	Programmation du processus de Traitement Numérique de Signal.....	57
4.2.3-	Implémentation du comportement du système de propulsion dans le FPGA.....	59
4.3-	SCHEMA RECAPITULATIF DE LA CONCEPTION DE CE PROJET SOUS LIBERO SOC.....	62
4.4-	RESULTATS ET COURBES REPRESENTATIVES	63
4.5-	CONCLUSION	65
	CONCLUSION GENERALE	66
	ANNEXE 1 : MOTEUR PAS A PAS STP-42CI48SE.....	67
	ANNEXE 2 : LES PROPRIETES DES TRANSDUCTEURS UTILISEES	68
	ANNEXE 3 : LE CIRCUIT IMPRIME DE LA CARTE D'ACQUISITION.....	70
	ANNEXE 4 : CARTE SMARTFUSION EVALUATION KIT A2F-EVAL-KIT-2 DE ACTEL.....	71
	ANNEXE 5 : CODE SOURCE DE FFT	73
	ANNEXE 6 : NOTION SUR LE GRAFCET	75
	BIBLIOGRAPHIE	xii

LISTE DES ABREVIATIONS

CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPS	Global Position System
GRAFCET	Grphe Fonctionnel De Commande Etape Et Transition
HDL	Hardware Description Language
I2C	Integrated Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OLED	Organic Light Emitting Diode
PLL	Phase Locked Loop
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
SMF	Sondeur Multifaisceaux
SoC	System on Chip
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static RAM
TFD	Transformée de Fourier Discrète
TFR	Transformée de Fourier Rapide
TTL	Transistor Transistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter

USB Universal Serial Bus

VHDL Very high description language Hardware Description Language

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Réflexion et réfraction d'une onde plane par un changement de célérité à l'interface entre deux milieux.....	7
Figure 1.2 - Illustration de l'impact d'erreur de célérité [3]	7
Figure 1.3 - Principe de fonctionnement du sondeur monofaisceau	10
Figure 1.4 - Principe de faisceaux croisés	12
Figure 1.5 - Forme temporelle et spectrale d'une impulsion monochromatique	14
Figure 1.6 - Illustration de l'émission du signal avec les faisceaux extrêmes	15
Figure 1.7 - Génération de secteurs à l'émission pour un SMF [3]	16
Figure 2.1 - Structure de chaîne de traitement de signal	18
Figure 2.2 – Les étapes de la conversion analogique numérique d'un signal	19
Figure 2.3 - Quantification de signal numérique sur 3 bits	20
Figure 2.4 – Schéma fonctionnelle d'un filtre numérique	23
Figure 2.5 – Conversion analogique numérique des données de l'hydrophone [13].....	26
Figure 2.6 – Architecture îlot de calcul, typique des FPGA actuels	29
Figure 3.1 – Schéma synoptique du sondeur « SoftEye_2 ».....	33
Figure 3.2 – Confirmation des antennes du sondeur SoftEye_2 ; en Rouge : antenne de réception et en Vert : antenne d'émission	34
Figure 3.3 - Algorithme qui génère 8 impulsions de Ping de 12 kHz	36
Figure 3.4 - Schéma synoptique de la génération d'un Ping de 12 Khz	37
Figure 3.5 - Antenne d'hydrophone avec des échos perpendiculaire à son axe.....	38
Figure 3.6 - Résultante des signaux enregistrés par chaque hydrophone, cas où $\Theta=0$	38
Figure 3.7 - Antenne d'hydrophone avec des ondes faisant un angle θ au large de la perpendiculaire	39
Figure 3.8 – Résultante des signaux enregistrés par chaque hydrophone, cas où $\Theta \neq 0$	39
Figure 3.9 - Amplificateur de tension réalisé sous SPICE	40

Figure 3.10 - Circuit de base du filtre anti-repliement à base de LM741 par Schematic du Pspice	41
Figure 3.11 - Configuration matérielle du module CAN	42
Figure 3.12 - Directivité associée à la configuration des hydrophones et décalage du temps T_i	43
Figure 3.13 - Mouvements du porteur ; ψ : tangage, ϕ : lacet, θ : roulis.....	45
Figure 3.14 - Effet de rotation sur chacune des trois axes référentiels du porteur.....	46
Figure 3.15 - Schéma illustratif du calcul de la profondeur avec l'angle θ_k	46
Figure 4.1 - Architecture générale du projet « SoftEye_2 »	48
Figure 4.2 - Vue générale du projet.....	49
Figure 4.3 - Système de propulsion.....	50
Figure 4.4 - Diagramme d'état du moteur en half-step	50
Figure 4.5 - Buzzer piézoélectrique	52
Figure 4.6 - Capsule de microphone à électret.....	52
Figure 4.7 - Agencement des antennes des émetteurs et récepteurs	53
Figure 4.8 - Schéma de réalisation de la carte d'acquisition.....	53
Figure 4.9 - Carte SmartFusion Evaluation Kit A2F-EVAL-KIT-2	54
Figure 4.10 - Flot de conception sous Libero Soc 11.5.....	57
Figure 4.11 - Séquence de commande du moteur en GRAFCET	60
Figure 4.12 - Schéma récapitulatif de la génération du signal 12 kHz avec les commandes du moteur.....	62
Figure 4.13- Courbe de niveau représentant les profondeurs du milieu étudié réalisé par matplotlib de Python	64
Figure A.1 - Enroulement interne du moteur	67
Figure A.2 - Position des pins de moteur pas à pas STP-42CI48SE.....	67
Figure A.3 - Effet piézoélectrique directe	68
Figure A.4 - Effet piézoélectrique inverse	68

Figure A.5 - Layout de la carte d'acquisition avec PROTEUS	70
Figure A.6 - Routage de la carte d'acquisition sous PROTEUS.....	70
Figure A.7 - Exemple d'un GRAFCET avec explication	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Coût du projet	55
Tableau II: Direction des faisceaux portés par l'angle θ_k , $N = 32$	63
Tableau III : Caractéristiques du FPGA embarqué sur la carte [18]	72
Tableau IV : Divergence ou Convergence de GRAFCET [22].....	77
Tableau V : Représentation de saut d'étapes [22].....	77

INTRODUCTION GENERALE

Les sondeurs multifaisceaux (SMF) bathymétriques sont des systèmes acoustiques complexes permettant une mesure de la hauteur d'eau sur un large secteur angulaire grâce à la formation des faisceaux de voies étroites dépointées de la verticale. L'apparition de ces systèmes dans les années 1970 a révolutionné le monde de la mesure bathymétrique en augmentant de façon considérable l'efficacité des campagnes de relevés cartographiques, où les sondes mesurées avec la technologie monofaisceau n'étaient disponibles qu'à la verticale du navire. De nombreux domaines scientifiques et industriels ont recours à l'utilisation de ces systèmes, depuis l'océanographie, la géologie jusqu'à l'exploitation pétrolière.

Le monde marin est peu transparent à la lumière, la majeure partie des méthodes classiques en domaine aérien comme le Radar, Lidar, Infra-Rouge, ne peut donc être utilisée pour faire la cartographie sous-marine. C'est pourquoi le SMF est devenu un outil précieux pour la détermination des profondeurs sur la totalité des fonds marin. Un nombre croissant de services hydrographiques mondiaux privilégie le SMF pour collecter des données bathymétriques utilisées dans la production de nouvelles cartes. Certains systèmes ont été conçus de manière à convenir à une utilisation en halieutique.

Pour ce projet de mémoire, l'étude se concentre sur l'utilisation des SMF à des fins hydrographiques, c'est-à-dire pour la réalisation de carte bathymétrique. Grâce à la performance du circuit programmable FPGA (Field Programmable Gate Array), à la possibilité de le programmer, et avec des transducteurs de bonne qualité qui effectue le sondage proprement dit, on peut réaliser un sondeur multifaisceaux bathymétrique. Le but final est d'obtenir les mesures bathymétriques, représenté sous forme de carte, de la partie insonifiée. Cela nous amène au titre : « Traitement numérique de signal du sondeur multifaisceaux « SoftEye_2 » par utilisation d'un circuit FPGA ».

Le premier chapitre de ce document présente les généralités sur la bathymétrie, les propriétés des ondes acoustiques sous-marines, ensuite les notions sur les sondeurs monofaisceaux et multifaisceaux. Dans le second chapitre, on parle du processus de traitement de signal, afin de pouvoir l'appliquer sur le système considéré ; suivi de l'étude d'un circuit FPGA qui joue un rôle important dans la génération du signal à émettre et au traitement des échos. Le troisième chapitre se focalise sur la présentation du projet « SoftEye_2 », son architecture et son fonctionnement. Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation du projet et son application.

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA BATHYMETRIE, LES ONDES ACOUSTIQUES, LES SONDEURS MONOFAISCEAUX ET MULTIFAISCEAUX

Les progrès dans le domaine de l'hydrographie sont liés au développement des systèmes de mesure acoustique tels que les sondeurs monofaisceaux et multifaisceaux.

La notion en bathymétrie, les propriétés des ondes acoustiques sous-marines, et les généralités sur les sondeurs monofaisceaux et multifaisceaux sont abordés dans ce chapitre.

1.1- NOTION SUR LA BATHYMETRIE

La détermination de la profondeur est une tâche importante pour l'hydrographe. Elle nécessite des connaissances spécifiques du milieu, de l'acoustique sous-marine, de l'ensemble des éléments disponibles pour la mesure du fond, des capteurs supplémentaires pour l'attitude et le pilonnement et des procédures propres pour appliquer les normes internationales recommandées pour la précision et la couverture des fonds.

La bathymétrie vient du grec *bathy* : profond, et *metron* : mesure, est la science de la mesure des profondeurs d'un plan d'eau par sondage et traitement des données correspondantes en vue de déterminer la topographie du sol de la mer. La bathymétrie est ainsi l'étude des profondeurs marines des étages d'un océan ou eau douce, ou d'un lac. [1]

L'objectif principal du levé bathymétrique est la détermination de la position, du brassage et de la nature d'un échantillon représentatif du fond, qui inclut l'ensemble des points hauts (têtes isolées, bancs, ...) et des objets susceptibles d'encombrer le fond : épaves, obstructions dans la mesure où ils représentent un danger pour la navigation.

Une carte bathymétrique représente le relief sous-marin, mais peut également contenir des informations supplémentaires pour la navigation. Les cartes bathymétriques peuvent également utiliser un modèle numérique de terrain et des techniques d'éclairage artificielles pour illustrer les profondeurs représentées. Ces cartes bathymétriques sont très utiles pour

l'interprétation de phénomènes naturels comme la propagation acoustique, courants, climats, ou pour l'étude de la géologie et la géomorphologie. Elles permettent également de donner des indications pour l'exploitation des océans : aménagements portuaires, industrie pétrolières, câbles sous-marin, pêche. [1]

1.2- ONDE ACOUSTIQUE SOUS- MARINE

Les ondes acoustiques sont provoquées par la propagation d'une perturbation mécanique: une compression-dilatation locale d'un élément du milieu se transmet à un élément adjacent du fait de son élasticité, et ainsi de proche en proche se propage en s'éloignant de la source la perturbation. Une telle onde nécessite un support matériel élastique pour pouvoir se propager (gaz, liquide ou solide). Les ondes sonores, audibles ou ultrasoniques, pénètrent et se propagent facilement dans tous les milieux élastiques qui se mettent à vibrer sous l'effet des variations de pressions. La majorité des capteurs utilisés pour la détermination de la profondeur utilisent les ondes sonores. [2]

Les sondeurs multifaisceaux font partie de la famille des sonars actifs pour lesquels on suit un signal depuis l'instant d'émission jusqu'à l'instant de réception de l'écho dont on mesure le temps et la direction d'arrivée. On doit caractériser son trajet entre ces deux instants. Pour réaliser un SMF, il est indispensable de connaître correctement la physique de propagation des ondes acoustiques dans le milieu marin.

1.2.1- Equation des ondes, intensité et puissance reçue

Les ondes acoustiques se propagent par le principe de variation de pression dans le milieu. La vitesse c de cette propagation, ou célérité, peut être déterminée par les caractéristiques physiques du milieu dans laquelle elle a lieu.

a- Equation des ondes

L'équation d'Alembert décrit la propagation des ondes, et p exprime la pression acoustique d'une onde se propageant dans un milieu (x, y, z) . On a en fonction du temps t :

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

On recherche la solution harmonique de l'équation des ondes, c'est-à-dire

$$p(x, y, z, t) = p(x, y, z) e^{j\omega_0 t}, \text{ où } \omega_0 \text{ est la pulsation de l'onde associée à une fréquence } f_0. [3]$$

b- Intensité de l'onde acoustique

Les ondes sonores sont produites par des faibles variations de champ de pression dans l'eau. Les particules d'eau de mer entrant en vibration se déplacent d'avant en arrière dans la direction de la propagation, produisant des zones alternées de compression et d'expansion similaires à celles produites par une corde vibrante.

L'intensité de l'onde acoustique I , qui est la quantité d'énergie traversant une unité de surface par seconde est définie par :

$$I = \frac{p_e}{\rho c} \quad (1.2)$$

- ρ : densité de l'eau
- c : célérité du son dans l'eau
- p_e : pression acoustique efficace donnée par l'équation (1.2), exprimée en pascal (Pa)

$$p_e = \frac{p}{\sqrt{2}} \quad (1.3)$$

Avec p : pression acoustique. [4]

c- Puissance acoustique reçue

A partir de l'intensité I , on définit la puissance acoustique P reçue par une surface S par : [4]

$$P = I * S \quad (1.4)$$

1.2.2- Perte de propagation de l'onde acoustique

Les pertes de propagation des ondes acoustiques sont majoritairement liées à deux effets principaux :

- la divergence géométrique,
- l'absorption par le milieu.

La propagation de l'onde dans l'eau de mer est soumise à l'absorption d'une partie de l'énergie par le milieu. Sans rentrer dans les détails, on retiendra que l'absorption est causée d'une part par la viscosité de l'eau, et d'autre part par la relaxation de certaines molécules spécifiques à l'eau de mer. L'eau est un milieu dissipatif, dans lequel l'amplitude de l'onde diminue de façon proportionnelle à elle-même. En conséquence la pression acoustique décroît de façon exponentielle avec la distance. [3]

1.2.3- Vitesse du son et profil de célérité dans l'eau

a- Vitesse ou Célérité du son

C'est un paramètre qui décrit la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu à partir de la source qui lui a donnée naissance. Elle impose les caractéristiques du milieu de circulation et dépende de la masse volumique et du module de compressibilité du milieu :

$$c = \frac{1}{\sqrt{E\rho}} \quad (1.5)$$

avec

- c : célérité
- ρ : densité du milieu
- E : compressibilité du milieu

La célérité acoustique dans l'eau de mer dépend de la température T , de la salinité S et de la pression P . Ces trois paramètres physiques permettent de décrire l'eau de mer. D'où provienne l'équation suivante :

$$C_{\text{eau_de_mer}} = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016P \quad (1.6)$$

Et $1450 < C_{\text{eau_de_mer}} < 1550$ m/s mais $C_{\text{eau_de_mer}} = 1500$ m/s est la valeur la plus utilisée.

La connaissance de ces paramètres dans l'ensemble de la colonne d'eau est essentielle afin de pouvoir tracer un profil de la vitesse du son dans l'eau. [5]

i- Salinité

La salinité quantifie le pourcentage massique de sels minéraux dissout dans l'eau pure. Elle est exprimée en pour mille (‰). La salinité moyenne de l'eau de mer se situe aux environs de 35‰ et une variation de 1‰ se traduit par une variation approximative de la célérité de 1,3 m/s. Ces variations dépendent de la position géographique, et très peu de la profondeur. [5]

ii- Température

La température varie en fonction de la position géographique, des saisons et de l'heure de la journée. Une variation de température de 1°C se traduit approximativement par une variation de 4,5 m/s de la célérité. [5]

iii- Pression acoustique

La pression acoustique est une variation autour de la pression statique moyenne. C'est donc la différence entre la pression qui existe à l'instant donné et celle qui existerai en ce point en l'absence de toute vibration acoustique.

L'unité de mesure de pression est le pascal (Pa) tel que $1 Pa = 1 N/m^2$. [5]

b- Profil de célérité

Le profil de célérité, souvent approximé à une stratification horizontale, devient important dans des configurations de mesure acoustique s'éloignant de l'incidence normale. En effet, en incidence oblique, l'onde est sensible à la réfraction dès qu'elle subit un changement de milieu. Ce profil de célérité est essentiel à la mesure bathymétrique car il permet de calculer les trajets de l'onde acoustique dans la colonne d'eau. L'équation de Snell-Descartes avec les notations de la Fig 1.1 décrit le changement de direction d'une onde plane à la traversée d'une interface entre deux milieux de célérité différente :

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2} \quad (1.7)$$

Si on généralise cette équation à un milieu continu de célérité non constante, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{\sin \theta(z)}{c(z)} = \text{constante} \quad (1.8)$$

Où z est la coordonnée de profondeur. Ainsi, on constate que la variation du profil de célérité du son change progressivement la direction de propagation de l'onde. La figure 1.1 ci-dessus présente la réflexion et réfraction d'une onde.

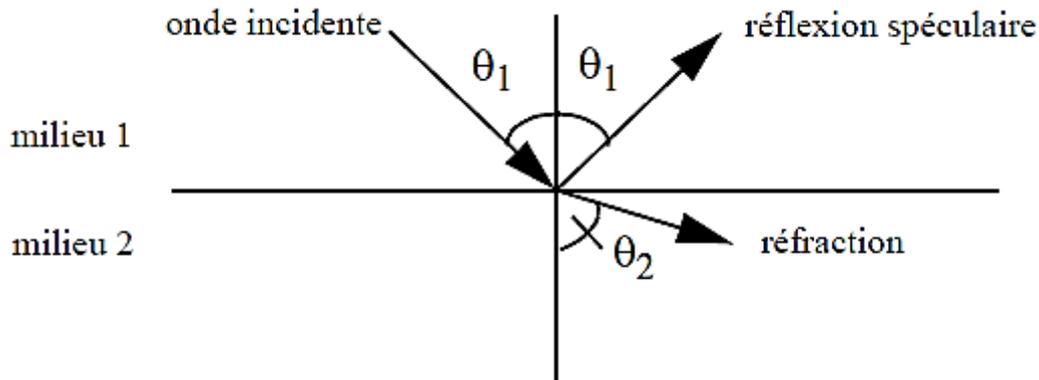


Figure 1.1 - Réflexion et réfraction d'une onde plane par un changement de célérité à l'interface entre deux milieux

On mesure le profil de célérité en début de levé bathymétrique et on le met à jour aussi souvent que possible. La figure 1.2 suivante illustre l'erreur engendrée par la supposition d'un profil de célérité erroné sur la colonne d'eau.

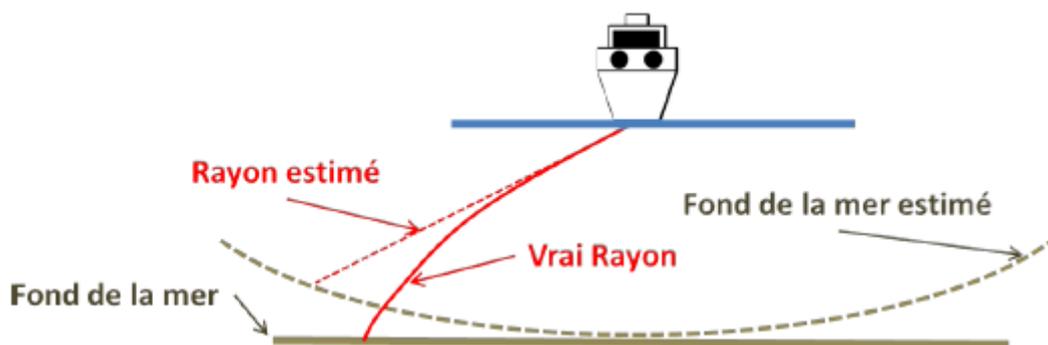


Figure 1.2 - Illustration de l'impact d'erreur de célérité [3]

En pratique, on constate que les erreurs de profil de célérité peuvent être remarquées pendant le levé en étant attentif à la forme du profil mesuré : une incurvation convexe ou concave régulière est un signe d'erreur.

1.2.4- Longueur d'onde et fréquence acoustique

a- Longueur d'onde acoustique

Elle est donnée par le rapport entre la vitesse de propagation et la fréquence d'onde.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.9)$$

Avec :

- c : célérité de l'onde acoustique, en [m/s].
- f : nombre de vibrations par seconde, en [Hz].
- λ : intervalle spatial entre deux points du milieu animés du même état vibratoire (avec un déphasage de 2π), en [m].

Cette longueur d'onde correspond à la distance parcourue par l'onde dans le milieu pendant une période de vibration. Pour un milieu de propagation donné, une onde acoustique basse fréquence aura une grande longueur d'onde. A l'inverse, si l'on utilise une vibration de fréquence plus élevée, la longueur d'onde sera réduite.

b- Fréquence acoustique

La fréquence acoustique du sondeur est le paramètre qui détermine la portée et la pénétration du son dans les sédiments, l'atténuation du signal acoustique dans l'eau étant proportionnelle à la fréquence. Plus haute est la fréquence, plus haute sera l'atténuation et par conséquent plus réduite sera la portée et la pénétration dans les sédiments. La largeur du faisceau dépend de la longueur d'onde acoustique et de la taille du transducteur. Pour une même longueur d'onde, une basse fréquence nécessitera un plus grand transducteur.

La fréquence d'émission du sondeur va impacter sur sa portée. Du fait de l'absorption de l'eau de mer, les basses fréquences vont se propager plus loin que les hautes fréquences.

Plus la fréquence est basse, plus l'onde pénètre dans les matériaux mous tels que les sédiments. La génération de signaux basse fréquence nécessite des antennes de grande dimension. [6]

1.3- LES SONDEURS ACOUSTIQUES

L'acoustique est aujourd'hui la seule technique applicable pour la mesure directe des fonds marins, quel que soit leur profondeur. Les sondeurs multifaisceaux et les sonars latéraux sont les outils d'acquisition les plus utilisés pour réaliser les levés cartographiques. Chaque système a ses propres spécificités en termes de signal acoustique, gamme de profondeur, précision, couverture. Notre étude se focalise sur les sondeurs monofaisceaux et multifaisceaux.

1.3.1- Sondeur monofaisceau

a- Principe de fonctionnement

Historiquement c'est le premier type de sondeur employé. Un transducteur émet une onde acoustique vers le fond à travers un faisceau dirigé selon la verticale du navire et mesure le temps nécessaire à ce signal pour parcourir le trajet navire / fond / navire. L'écho est reçu par ce même transducteur. Connaissant la vitesse de propagation du son dans l'eau et le temps entre l'émission du signal et la réception de l'écho du fond, on détermine la distance entre le sondeur et le fond par la relation :

$$P = c * \Delta t / 2 \quad (1.10)$$

avec :

- P : profondeur ou distance entre sondeur et fond
- c : célérité du son dans l'eau
- Δt : temps de parcours émetteur-fond-récepteur

A chaque émission, le sondeur fournit une valeur de hauteur d'eau sous le navire en analysant le signal retour. [6]

La figure 1.3 suivante permet de bien comprendre le principe du sondeur monofaisceau.

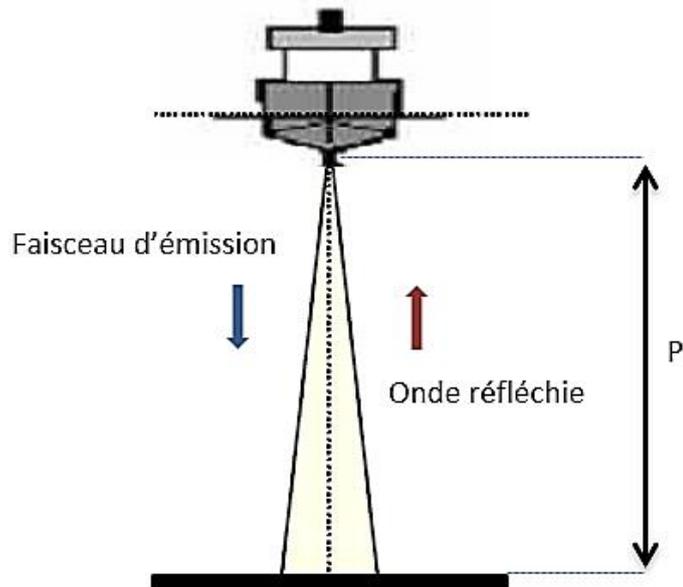


Figure 1.3 - Principe de fonctionnement du sondeur monofaisceau

b- Limite du sondeur monofaisceau

La technique de levé bathymétrique par sondeur monofaisceau comporte donc des limitations dues à sa médiocre résolution spatiale horizontale. Ce type d'échosondeur ne permet qu'une insonification partielle, c'est-à-dire, insonification ponctuelle du fond. De plus, dans le traitement du sondeur monofaisceau, on traite un fond plat, ce qui n'est pas toujours le cas. Les informations que fournit ce sondeur sont une série d'amplitude d'écho en fonction du temps. Par conséquent, un observateur ne peut pas être sûr de l'endroit exact de la source des échos. [6]

1.3.2- Sondeurs multifaisceaux

Les sondeurs multifaisceaux sont des systèmes acoustiques sous-marins installés généralement sous la coque du navire. Ils mesurent simultanément la profondeur selon plusieurs directions, déterminées par les faisceaux de réception du système. Ces faisceaux forment une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire et fournissent un modèle très précis de la topographie sous-marine du fond suivant une large bande. Un sondeur multifaisceaux est un sondeur acoustique à large ouverture angulaire qui peut aller de 90° à 150° suivant le sondeur.

Le sondeur multifaisceaux possède deux avantages par rapport au sondeur monofaisceau :

- il permet d'explorer, insonifier, un large couloir, le long de la route du navire,
- sa résolution est grande, d'autant plus grande que ses faisceaux sont étroits.

a- Architecture d'un sondeur multifaisceaux

Le sondeur proprement dit comprend :

- des antennes d'émission et de réception ;
- une unité d'émission/réception générant le faisceau d'émission, assure la réception des signaux et leur traitement ;
- une interface homme-machine : une station de travail qui permet à l'opérateur de piloter le sondeur et de contrôler son bon fonctionnement.

Afin de déterminer des sondes dans un repère absolu (profondeur associée à une position géographique), un sondeur multifaisceaux doit être associé à différents capteurs auxiliaires :

- un système de positionnement : comme le GPS (Global Position System) ;
- une centrale d'attitude, de cap et de pilonnement, déterminés à l'aide de systèmes utilisant des techniques inertielles combinées à des mesures de GPS ;
- un système de mesure de profil de célérité, nécessaire pour établir le trajet de l'onde sonore pour une incidente et une durée de trajet donnée ;
- un célérimètre pour mesurer en permanence la célérité de surface, utilisée pour la formation des faisceaux ;
- un appareil de mesure de la marée : comme un GPS.

b- Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des SMF est basé, en général, sur l'émission d'une impulsion en forme d'éventail dont l'énergie acoustique est ensuite réfléchi par le fond. Le SMF comporte plusieurs faisceaux d'incidence connue, formés électroniquement en utilisant des techniques de traitement du signal. Le trajet aller-retour entre l'émission et la réception est calculé par des algorithmes de détection du fond. Le faisceau émis est étroit dans l'axe du navire et large par le travers ; inversement les faisceaux formés à la réception sont étroits par le travers et allongés dans l'axe. Les intersections des faisceaux avec le plan du fond définissent les pastilles insonifiées (ou zone du fond explorée) pour lesquelles les profondeurs

sont mesurées. Les SMF fonctionnent selon la technique dite de « faisceaux croisés », indiqué à la Fig 1.4.

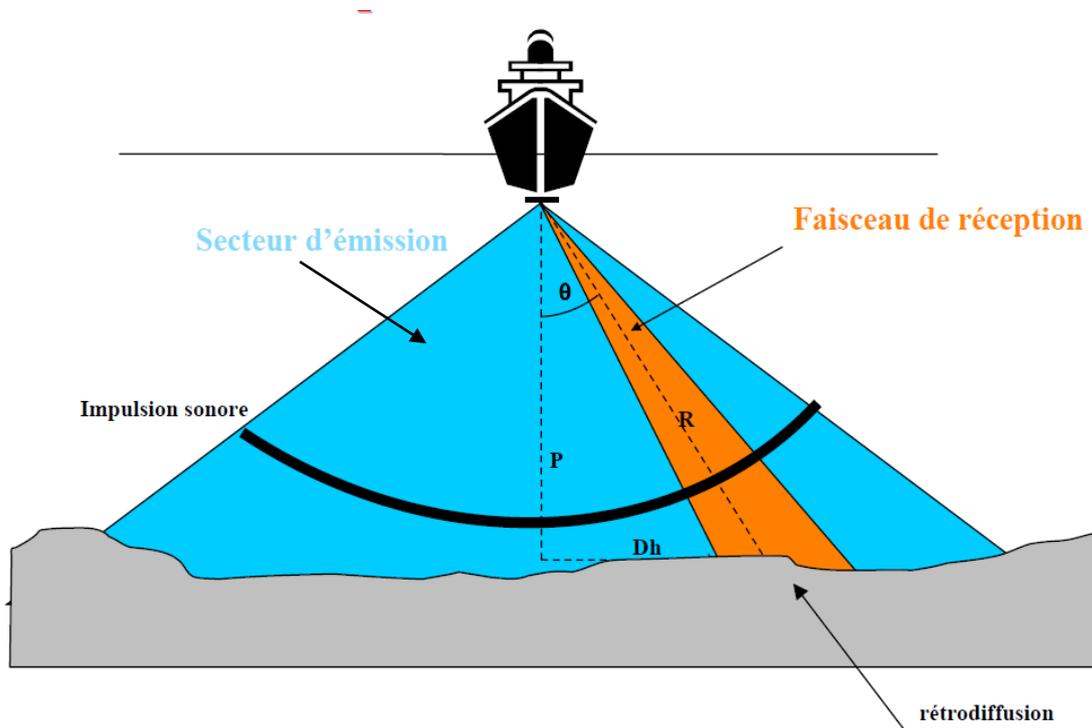


Figure 1.4 - Principe de faisceaux croisés

Une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'émission étroit dans la direction longitudinale (typiquement de l'ordre de 1° à 5°) et large transversalement (typiquement 150°). La réception se fait à l'aide de faisceaux assez larges longitudinalement (de l'ordre de 20°) et étroits dans le plan transversal (de l'ordre de 1° à 5°). Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée (pastille insonifiée) est l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception. [7]

c- Caractéristiques des sondeurs multifaisceaux

i- Fréquence acoustique

C'est la fréquence de l'impulsion sonore émise.

$$f = c/\lambda \quad (1.11)$$

Avec c : célérité

λ : longueur d'onde

La fréquence est un élément important dans la définition d'un échosondeur. Elle détermine :

- la portée du sondeur. L'amortissement du son dans l'eau augmente très vite avec la fréquence.
- la pénétration dans les matériaux mous. Plus la fréquence est basse, plus elle pénètre dans les matériaux mous tels que les sédiments. Les sondeurs à 3.5 kHz sont dédiés à la mesure des couches sédimentaires.
- la taille des antennes. La génération de signaux basse fréquence nécessite des antennes de grandes dimensions.
- la résolution spatiale (liée à la finesse des faisceaux). [8]

ii- Le nombre de faisceaux

Il varie, selon les équipements, d'une dizaine à plusieurs centaines.

iii- L'ouverture angulaire

Il représente la largeur angulaire de la fauchée. C'est l'angle entre les faisceaux extrêmes. Elle varie en général de 90° à 150° et distingue :

- la largeur longitudinale (parallèle à l'axe du navire) : c'est la largeur angulaire longitudinale du faisceau d'émission ;
- la largeur transversale (perpendiculaire à l'axe du navire) : c'est la largeur angulaire du faisceau de réception ;

Ces largeurs varient typiquement de 1° à 5°. [8]

iv- La répartition des faisceaux

Elle est soit :

- équiangulaire : l'angle entre l'axe de deux faisceaux consécutifs est constant
- équidistante : la distance entre les centres des pieds de faisceaux est constante. [8]

v- La durée d'impulsion sonore émise τ

Les signaux les plus couramment utilisés sont des impulsions monochromatiques ou « Ping » : portion de signaux sinusoïdaux limités à une durée τ .

Plus la durée d'émission est longue, plus la portée est grande, plus la résolution est faible. [8]

vi- *La cadence d'émission*

C'est la durée entre deux émissions consécutives de Ping du sondeur. Elle est au moins plus longue que la durée du trajet aller/retour des faisceaux extrêmes (moins d'un dixième de seconde par petits fonds, plusieurs dizaines de secondes par grands fonds). Elle est soit constante par exemple fixée par l'opérateur, soit réglée automatiquement, en fonction du trajet des faisceaux extrêmes. [8]

d- *Emission et réception du signal sonore*

i- *Impulsion monochromatique ou Ping*

Les sondeurs multifaisceaux bathymétriques émettent des impulsions monochromatiques ou Ping : sinusoïdales de fréquence f_0 (fréquence porteuse) émises pendant une durée τ (durée d'impulsion).

Si $0 < t < T$

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t) \quad (1.13)$$

- T : période
- A : amplitude du signal

Le spectre de ce signal est un sinus cardinal centré sur la fréquence porteuse, et la largeur de bande à -3 dB vaut $\delta f = 1/\tau$.

$$S(f) = A \frac{\sin(2\pi\tau(f - f_0))}{2\pi\tau(f - f_0)} \quad (1.14)$$

La figure 1.5 montre la forme d'un Ping dans le temps et sa forme spectrale correspondante.

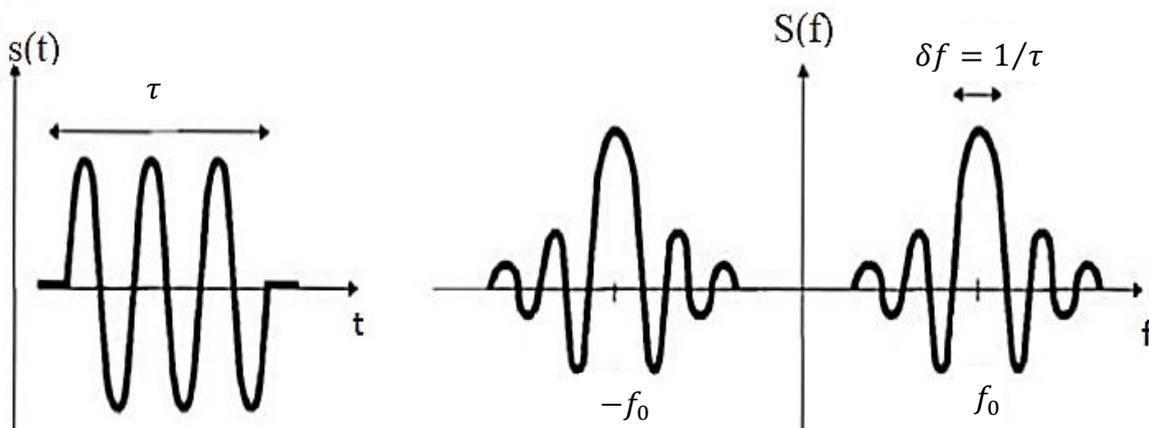


Figure 1.5 - Forme temporelle et spectrale d'une impulsion monochromatique

La largeur de bande occupée par un Ping de durée τ à -3dB vaut $\delta f = 1/\tau$. La réverbération limite la durée d'impulsion à une longueur déterminée, afin d'améliorer la résolution au niveau de la réception. On peut donc déterminer une durée d'impulsion τ correspondant à un transducteur de bande passante 880 Hz égale à 1 ms.

Le temps requis entre les transmissions de Ping est appelée le temps ou intervalle de Ping. En utilisant un cycle continu de Ping, une série de mesure de profondeur sont prises et connectés. [9]

ii- Phase d'émission

Le signal émis par le système multifaisceaux possède une directivité particulière. Transmis par une antenne linéaire, le signal envoyé va rencontrer le fond sur une bande très étroite, suivant la ligne de fond du navire, mais très large sur bâbord et tribord.

La durée entre deux émissions consécutives du sondeur est au moins plus longue que la durée du trajet aller/retour des faisceaux extrêmes.

Soit : $T_e > 2 R_M / c$ avec R_M distance oblique maximale $R_M = \frac{P}{\cos \theta_M}$

Où P : profondeur

θ_M : demi-ouverture du faisceau d'émission

c : célérité

La figure 1.6 illustre l'émission du signal avec les faisceaux extrêmes.

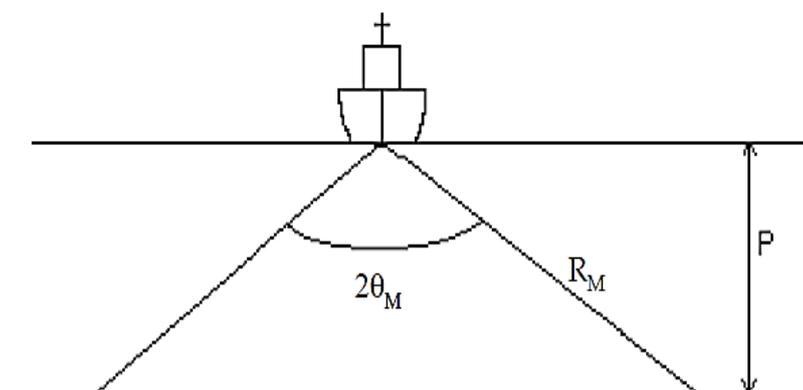


Figure 1.6 - Illustration de l'émission du signal avec les faisceaux extrêmes

Il est possible de générer plusieurs émissions successives dans différents secteurs angulaires transversaux afin de couvrir l'ensemble de la fauchée. Ces secteurs sont générés en utilisant la

largeur (transversale à l'axe du porteur) de l'antenne d'émission pour effectuer une formation de voie latéralement sur l'antenne d'émission. La configuration résultante est représentée à la Fig 1.7 ci-après.

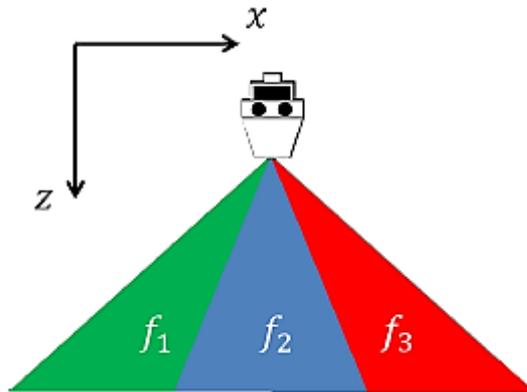


Figure 1.7 - Génération de secteurs à l'émission pour un sondeur multifaisceaux [3]

iii- Phase de réception

L'antenne utilisée en réception est une antenne linéaire, perpendiculaire à l'antenne d'émission. Au cours de la phase de réception, chaque transducteur élémentaire, constituant l'antenne, échantillonne les échos renvoyés par le milieu marin. On obtient ainsi une matrice contenant des informations sur le signal reçu, pour tous les transducteurs élémentaires, au cours de toute la phase d'écoute.

1.4- CONCLUSION

Un sondeur multifaisceaux est un outil conçu pour la cartographie, avant tout pour obtenir une mesure précise de la bathymétrie sur une large fauchée. L'onde sonore reste le paramètre principal utilisé pour la mesure bathymétrique.

Le prochain chapitre se focalise sur le traitement numérique de signal et sur l'étude du circuit FPGA, la carte qui embarquera tous les traitements de données issues du sondeur multifaisceaux en vue de la réalisation du projet « SoftEye_2 ».

CHAPITRE II :

LE TRAITEMENT NUMERIQUE DE SIGNAL (TNS) ET LE CIRCUIT LOGIQUE PROGRAMMABLE FPGA

La technologie multifaisceaux implique un certain nombre de disciplines, notamment de l'acoustique sous-marine et le traitement numérique du signal. Son principe est basé sur l'émission d'une onde sonore (signal analogique) dans l'eau, et la réception des échos à travers un transducteur. Les signaux reçus sont analogiques et bruités, il faut donc les filtrer et les convertir en numérique avant le traitement dans le circuit FPGA.

2.1- LE TRAITEMENT NUMERIQUE DE SIGNAL ou DIGITAL SIGNAL PROCESSING (DSP)

2.1.1- Généralités

Il existe deux types de signaux électriques :

- Le signal analogique, qui est un signal continu en temps et en amplitude, dont la grandeur représentative à un instant donné est une tension
- Le signal numérique, qui est un signal échantillonné et quantifié, discret en temps et en amplitude, dont la grandeur représentative à un instant donné est une valeur binaire.

Tout système de traitement de signaux faisant appel à un ordinateur ou à un processeur numérique spécialisé implique nécessairement une opération préliminaire de conversion analogique-numérique.

Une chaîne de traitement numérique du signal a la structure présentée à la Fig 2.1.

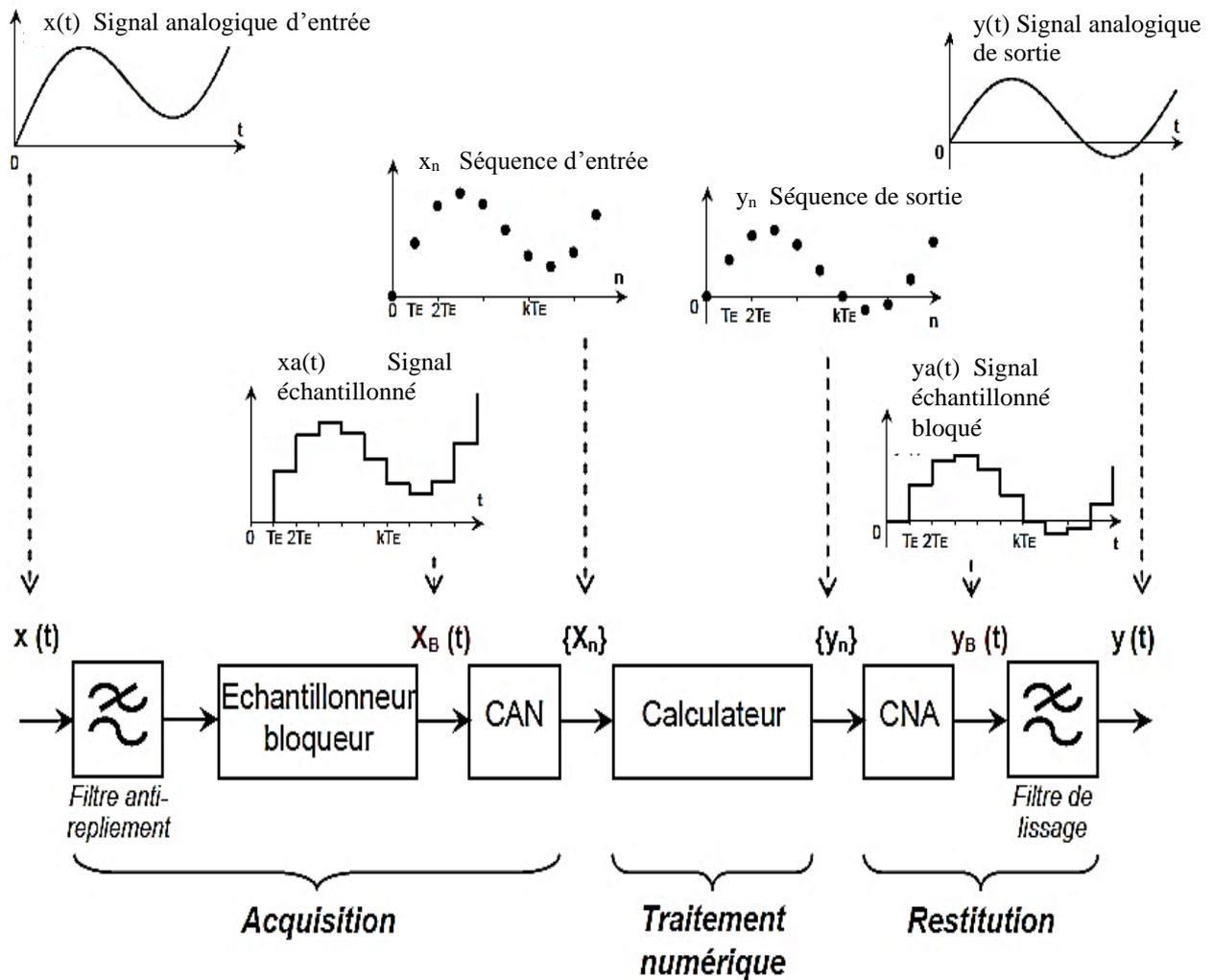


Figure 2.1 - Structure de chaîne de traitement de signal

a- Filtre anti-repliement

Afin d'éviter le repliement des spectres, il est indispensable d'introduire un préfiltrage du signal analogique avant de procéder à l'échantillonnage. Le spectre du signal ne dépasse en aucun cas la fréquence de Nyquist $F_e/2$. Cette fréquence est la plus élevée du signal qui soit sa propre réplique. Le dispositif chargé d'éliminer les parties du signal qui ne contiennent aucune information pertinente, parce que leur fréquence est supérieure à la fréquence maximale qu'on envisage de transmettre, s'appelle un filtre anti-repliement. On fait donc précéder un système de filtre passe-bas « anti-repliement » éliminant les signaux de fréquence supérieur à $F_e/2$. Ce filtre permet de travailler dans la zone utile du filtre numérique c'est-à-dire dans la bande de fréquences située entre 0 Hz et 500 Hz. [10]

b- Conversion Analogique Numérique : CAN

Conceptuellement, la CAN peut être divisée en trois étapes : **l'échantillonnage temporel, la quantification et le codage.**

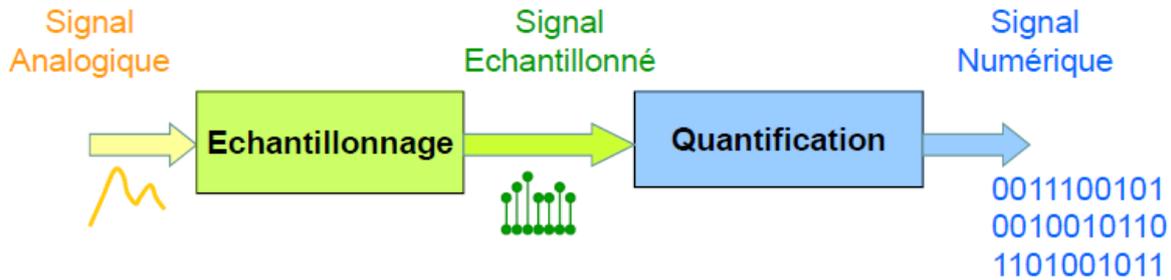


Figure 2.12 – Les étapes de la conversion analogique numérique d'un signal

i- Echantillonnage

L'échantillonnage est la discrétisation du signal avec une durée constante pour obtenir un flux discontinu de valeurs ponctuelles. Cette période (T_e) est choisie selon une règle connue par le théorème de Shannon afin d'éviter toute perte de données.

Théorème de Shannon

Lorsqu'un signal $x(t)$ a un spectre à support borné [$X(f) = 0$ pour $|f| > f_{max}$], il est possible d'échantillonner ce signal sans perdre d'information : il suffit pour cela de choisir une fréquence d'échantillonnage $f_e > 2f_{max}$. On pourra alors reconstruire $x(t)$ parfaitement à partir des échantillons $x(nT_e)$, avec $T_e = 1/f_e$.

Dans les conditions du théorème d'échantillonnage :

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_e) \text{sinc}[f_e(t - nT_e)] \quad (2.1)$$

Le signal échantillonné est défini comme une suite de valeurs numériques réel ou complexe, et représenté par $x(kT_e)$, $k \in \mathbb{N}$. Les points obtenus pouvant avoir une infinité de valeurs, nous passerons alors à la quantification pour obtenir un ensemble fini de valeurs numériques. Le signal passera ensuite par un bloqueur d'ordre zéro afin que la valeur échantillonnée puisse être maintenue pour être correctement quantifiée par le convertisseur. [11]

ii- Quantification

La quantification consiste à associer à une marge de valeurs d'un état avec un numéro comme présenté à la Fig 2.3. Puisque le système numérique traite uniquement les binaires, les états se traduisent par un nombre binaire représentant sa valeur selon le codage voulu (complément à deux, codage Gray,...).

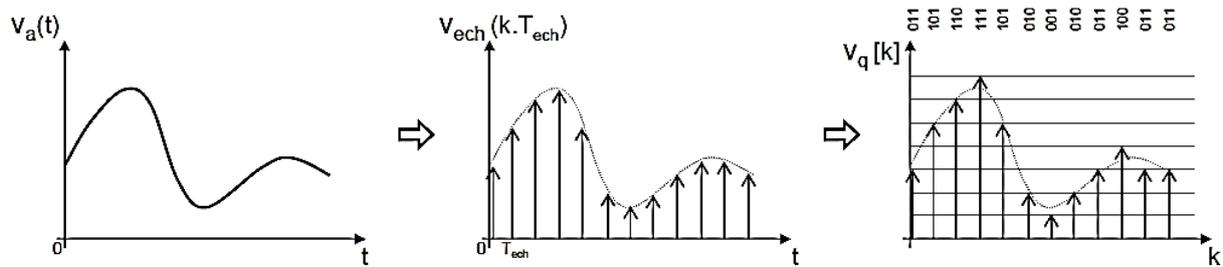


Figure 2.13 - Quantification de signal numérique sur 3 bits

Principe de la quantification

Soit un signal échantillonné $s(t)$ et un signal quantifié $s_q(t)$.

Deux valeurs échantillonnées infiniment voisines en valeur ne peuvent pas être distingué l'une de l'autre. Deux valeurs de s ne sont alors discernables que si leur différence est au moins égale à un minimum q appelé échelon de quantification. L'opération permettant de passer des valeurs réelles des amplitudes à leur mesure est dite opération de quantification.

Elle consiste à remplacer chaque valeur des échantillons du signal s mesuré par un multiple entier x_q tel que :

$$x \rightarrow x_q = kq \quad (2.2)$$

Avec $q = \frac{1}{2^n - 1}$ (avec n bits on dispose de 2^n valeurs, soit $2^n - 1$ intervalle de tension distincts ; et $k \in \mathbb{N}$. [11])

c- Transformée de Fourier Discrète (TFD) et Transformée de Fourier Rapide (TFR)

L'outil mathématique de base utilisé en traitement de signal est la Transformée de Fourier (TF). La TF d'un signal temporel $x(t)$ est une fonction de fréquence f définie par la relation intégrale : [11]

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

Lorsqu'on désire calculer la TF d'une fonction $x(t)$ à l'aide d'un ordinateur ou d'un calculateur numérique, ce dernier n'ayant qu'un nombre de mots de taille finie, on est amené à :

- discrétiser la fonction temporelle ;
- tronquer la fonction temporelle ;
- discrétiser la fonction fréquentielle.

C'est pourquoi on doit recourir à la TFD et la TFR

i- Transformée de Fourier Discrète

La TFD est utilisée, lorsqu'on travaille avec des suites numériques sans lien avec un signal physique, pour définir une représentation de la suite sur une base de fonctions fréquentielles.

On appelle Transformée de Fourier Discrète d'une suite de N termes $x(0), x(1), \dots, x(n-1)$, la suite de N termes $X(0), X(1), \dots, X(N-1)$, définis par :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (2.4)$$

En pratique, les N termes $x(n)$ peuvent être N échantillons d'un signal analogique échantillonné : $x_n = x(nT_e)$, et les N termes $X(k)$ correspond à une approximation (à un facteur multiplicatif T_e près) de la TF de ce signal aux N points de fréquence $f_k = k f_e/N$, avec k entre 0 et $N-1$, c'est-à-dire f entre 0 et f_e . [12]

ii- Lien entre la Transformée de Fourier et la Transformée de Fourier Discrète

Soit $x(t)$ un signal analogique continu.

- On échantillonne $x(t)$ à $f_e = 1/T_e$.

$$x(t) \rightarrow x_e(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_e) \delta(t - nT_e) = x(t)P(t) \quad (2.5)$$

où $P(t)$ est la fonction peigne.

L'échantillonnage rend le spectre périodique et peut entraîner un phénomène de recouvrement de spectre.

- On tronque la suite $x_e(nT_e)$ en ne conservant qu'un nombre fini N de termes pour obtenir le signal $x_{tr}(t)$ formé des échantillons : $x(0) \dots x((N - 1)T_e)$:

$$x_{tr}(t) = x_e(t)F(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_e) \delta(t - nT_e) \quad (2.6)$$

- On échantillonne $X_{tr}(f)$ à $1/T_0$
On obtient alors N valeurs différentes espacées de $1/T_0$ entre 0 et $1/T_e$, car $T_0 = NT_e$.

iii- Transformée de Fourier Rapide

La TFD est un outil qui demande beaucoup de ressources de calcul. Mais il existe un algorithme de calcul particulièrement rapide et efficace qui continue à rendre la TFD attractive.

La TFR est simplement une TFD calculée selon un algorithme permettant de réduire le nombre d'opération et, en particulier, le nombre de multiplication à effectuer. Il faut noter cependant que la réduction du nombre d'opérations arithmétiques à effectuer n'est pas synonyme de réduction du temps d'exécution. Tout dépend de l'architecture du processeur qui exécute le traitement.

Pour calculer la TFD, on doit calculer N valeurs $X(k)$:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} \quad (2.7)$$

et ceci pour $k \in [0, N - 1]$

Si on effectue le calcul directement sans algorithme efficace, on doit effectuer :

$$\begin{cases} N^2 & \text{multiplications complexes} \\ N(N - 1) & \text{additions complexes} \end{cases}$$

Il existe deux versions de l'algorithme de TFR :

- TFR avec entrelacement temporel,
- TFR avec entrelacement fréquentiel.

L'algorithme nécessite que N soit une puissance de 2. Le principe de l'algorithme consiste à décomposer le calcul de la TFD d'ordre $N = 2^l$ en l étapes successives. [12]

d- Le filtrage numérique

On appelle filtre toute fonction linéaire et invariante transformant un signal numérique en un signal numérique. Le filtrage et l'analyse spectrale sont des techniques de base dans le traitement numérique du signal.

Un système ou filtre numérique S , transforme un signal d'entrée (ou excitation) $x(k)$ en un signal (ou réponse) $y(k)$ comme représenté à la Fig 2.4.

$$y(k) = S[x(k)]$$

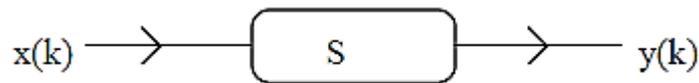


Figure 2.14 – Schéma fonctionnelle d'un filtre numérique

On classe les filtres en deux grandes familles et suivant la durée de leur réponse impulsionnelle.

i- Le filtre numérique à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF)

Une opération de filtrage est définie par une convolution avec une séquence de durée finie $f(n)$.

Il s'agit d'une simple transposition de l'équation du produit de convolution en temps continu dans le domaine du temps échantillonné.

Soit deux séquences échantillonnées numériques de durée finie.

Soit $x(n)$ de durée $n \in [0, N_x - 1]$ et $f(n)$ de durée $n \in [0, N_h - 1]$.

$$x(n) \quad 0 \leq n \leq N_x - 1$$

$$f(n) \quad 0 \leq n \leq N_h - 1$$

Les séquences apériodiques sont nuls hors de leur intervalle de définition.

La convolution apériodique (ou linéaire) de $x(n)$ avec $f(n)$ est un produit scalaire entre $x(n)$ et $f(-n)$ pour chaque position entre 0 et $N_x + N_h - 2$.

$$y(n) = x(n) * f(n) = \sum_{m=0}^{N_x + N_h - 2} x(m) \cdot f(n - m) = \sum_{m=0}^{N_x + N_h - 2} x(n - m) \cdot f(m) \quad (2.8)$$

La taille du résultat est de $N_x + N_{h-1}$ échantillons.

Un filtre RIF est stable, mais le retard entre l'entrée et le sorti (phase) peut être relativement long. [12]

ii- *Le filtre numérique à Réponse Impulsionnelle Infinie (RII)*

Le filtre RII est un filtre pour lequel la réponse impulsionnelle n'est pas finie ; typiquement réalisé par une opération linéaire récursive. C'est pourquoi, on le nomme aussi filtre récursif. La valeur d'un échantillon de sortie est fonction des échantillons d'entrée et de sortie précédents.

Pour un filtre RII, la réponse impulsionnelle ne peut pas être calculée (par définition). Le filtre est spécifié par deux jeux de coefficients $a(n)$, $1 \leq n \leq N$ et $b(n)$, $0 \leq n \leq M$:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} b(m)x(n-m) - \sum_{m=1}^{M-1} a(m)y(n-m-1) \quad (2.9)$$

On remarque que cette équation fait intervenir non seulement les échantillons retardés du signal d'entrée mais également les échantillons retardés du signal de sortie.

L'intérêt des filtres récursifs est leur faible coût en calcul ; et leurs inconvénients sont la non-linéarité en phase et son instabilité numérique. [12]

iii- *Caractérisation des filtres numériques*

Un filtre F, RIF ou RII, est caractérisé par :

- Sa réponse $f(n)$ à l'impulsion numérique $\delta(n)$, ou
- Sa fonction de transfert $F(\omega)$ ou $F(z)$ calculé par sa TFD ou Transformé en Z

Les filtres sont généralement spécifiés dans le domaine Fourier ou dans le domaine z.

Pour un filtre RIF, la réponse à l'impulsion numérique est précisément sa jeux de coefficients $f(n)$, où $f(n) = f(n) * \delta(n)$.

Sa fonction de transfert est donc :

$$F(\omega) = \sum_{n=-N}^N f(n) e^{-j\omega n} \quad (2.10)$$

Pour un filtre RII, $f(n)$ est infini.

e- Conversion Numérique Analogique : CNA

Le CNA convertit un signal numérique en un signal analogique. Son but est de fournir un signal continu entre chaque échantillon. Cette opération consiste à réaliser une interpolation continue entre les valeurs numériques fournies par le processeur à chaque période d'échantillonnage. On peut imaginer différents interpolateurs allant du simple au compliqué :

- L'interpolateur d'ordre 0 qui maintient constante la valeur numérique fournie ;
- L'interpolateur d'ordre 1 qui relie linéairement deux valeurs numériques successives ;
- L'interpolateur d'ordre 2 qui relie paraboliquement trois valeurs numériques successives ;
- L'interpolateur idéal qui remplace chaque valeur numérique par un sinus cardinal.

L'interpolateur le plus simple est celui d'ordre zéro et c'est également celui qui est réalisé par un CNA classique. Il est souvent désigné sous le nom de bloqueur d'ordre zéro. [12]

f- Filtre de reconstitution

On peut se rapprocher d'un signal analogique plus habituel en éliminant les escaliers du signal $x_s(t)$ créé par le CNA. Pour cela, on fait suivre le convertisseur d'un filtre passe-bas, dit de reconstitution ou de lissage. La bande passante de celui-ci doit être suffisante pour laisser passer l'information contenue dans la bande de base du signal numérique. Comme celui-ci s'étend de 0 à $F_e/2$, les filtres anti-repliement et de reconstitution sont généralement les mêmes. [12]

2.1.2- Traitement numérique des données issues des sondeurs multifaisceaux

Les différents bruits accompagnant les signaux reçus par le SMF sont :

- Bruit gaussien circulaire : modélisant le phénomène acoustique,
- Bruit multiplicatif : issu de l'interaction de l'onde acoustique émise avec le fond de la mer,
- Bruit additif : venant de diverses origines, tel que le bruit du navire porteur, l'agitation de la surface de la mer, le trafic maritime, les précipitations ou encore les mammifères marins.

[3]

Etapes de traitement de signal

Les échos des Pings lors de la réception sont collectés par les éléments individuels du tableau d'hydrophones sous forme analogique. Chaque hydrophone signale des tensions continues représentant les amplitudes et phases d'entrées des signaux. Avant de traiter les signaux reçus, il est indispensable de les filtrer afin d'éliminer les bruits qui peuvent fausser les résultats du traitement de signal. Ces signaux continus sont convertis en signaux numériques discrètes du CAN. Les données numériques prennent la forme de lecture de multiple tension, chacun représente la valeur du signal analogique continu à un instant précis dans le temps. Collectivement, toutes les informations instantanées du signal et la phase de tous les hydrophones dans l'un de ces instants de temps précis s'appellent une tranche de temps des données. Les tranches de temps sont séparées dans le temps par l'intervalle d'échantillonnage.

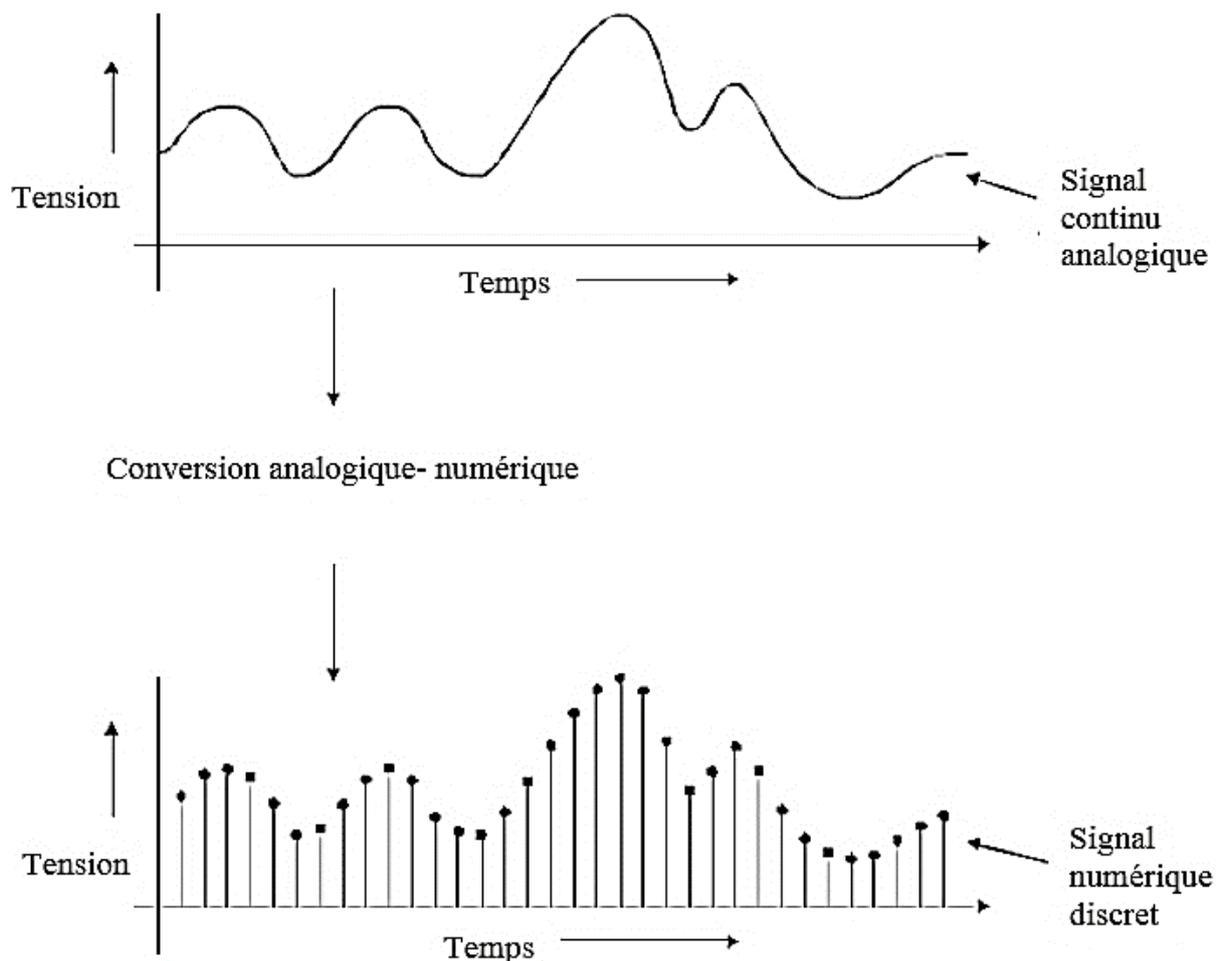


Figure 2.1 – Conversion analogique numérique des données de l'hydrophone [13]

Toutes les tranches de temps contenant les échos d'un Ping du SMF sont appelés un Ping de données.

Certains traitement de données, en particulier dans les premiers stades, se fait sur une base par tranche de temps. Pour instance, le processus de la TFR est appliqué à chaque tranche horaire, ce qui donne de l'amplitude des échos reçus de l'ensemble de tous les faisceaux en une seule fois instantanée. Les données numériques brutes de l'hydrophone après la conversion analogique numérique, qui se compose de mesures de signal et phase d'information, sont traitées sur une base de temps tranche-par-tranche par la TFR pour produire des données du faisceau orienté.

Tous ces traitements de signal se déroulent dans le processeur de traitement de signal FPGA.

2.2- GENERALITES SUR LES CIRCUITS FPGAs

Les FPGAs sont des circuits intégrés en Silicium qui contiennent des blocs logiques configurables (programmables), ainsi que des interconnexions configurables entre ces blocs. Ce sont des circuits numériques configurables dédiés à l'électronique numériques. Ils offrent la possibilité de réaliser des fonctions numériques plus ou moins complexes. La configuration du circuit, c'est-à-dire la programmation de sa fonction, se fait sur place (Field Programmable), sans envoi chez un fabricant. [14]

2.2.1- Les composants dans la carte FPGA

Pour pouvoir être programmé, le FPGA a besoin d'une carte de développement. C'est un environnement de test et de conception. C'est une carte qui a été conçue en interne par un autre laboratoire de validation dont voici sa composition :

- **Une connexion USB** (Universal Serial Bus) qui lui permet de communiquer avec l'ordinateur afin de recevoir des instructions grâce à un logiciel de pilotage.
- **Des éléments de test** qui comme le logiciel, permettent d'interagir avec le circuit. Le but étant de tester si le FPGA répond correctement à des instructions simples. C'est idéal pour commencer à déboguer un montage. Ces interactions se font à l'aide de commandes envoyées par exemple par l'actionnement d'un bouton poussoir. Le FPGA peut renvoyer une information sous la forme d'une séquence d'allumage de LED.
- **Un connecteur pour la programmation** pour brancher l'interface de programmation.
- **Une mémoire Flash** externe qui reprogramme de façon autonome le FPGA.

- **Des connecteurs** pour la connexion d'une horloge externe ; et d'autres pour la relier à d'autres cartes de test.
- **Le circuit FPGA.**

Tout cet environnement implique la présence d'une alimentation générale de la carte de 5V.

2.2.2- Architecture des FPGAs

L'architecture d'un FPGA est principalement décrite par la topologie des ressources de routages et des éléments logiques configurables de base. Les architectures sont principalement de style îlots de calculs avec une légère hiérarchie (un ou deux niveaux de cluster hiérarchique). Dans ce cas les ressources configurables sont disposées sous forme de matrice. Des lignes de routage sont disposées horizontalement et verticalement autour des ressources configurables. Des blocs de connexion relient les ressources configurables aux lignes de connexion. Des matrices de connexion relient les lignes de routage horizontales et verticales. Les liaisons points à points entre deux éléments configurables, comme représenté à la Fig 2.1, utilisent : les ports d'entrées/sorties des éléments configurables, les connexions configurables qui permettent la connexion des éléments configurables au réseau de routage, les lignes de routages et les matrices de connexions configurables. [15]

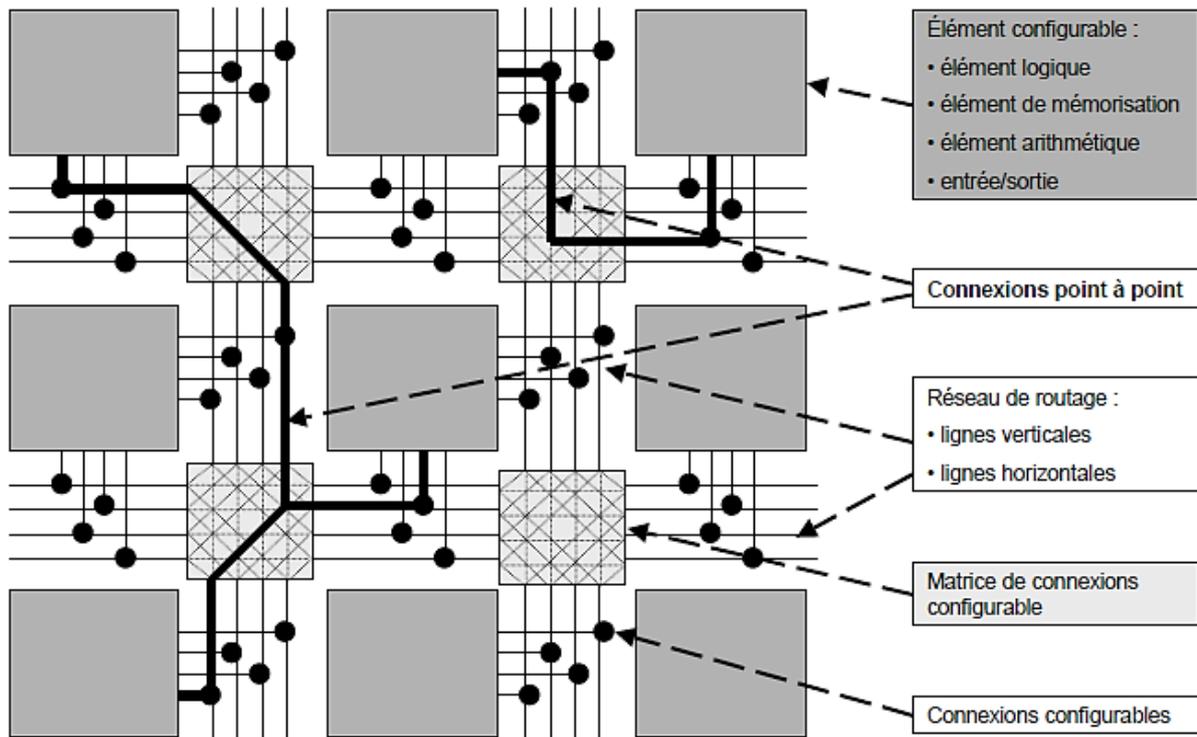


Figure 2.2 – Architecture îlot de calcul, typique des FPGA actuels

2.2.3- Configuration et reconfiguration des FPGAs

La configuration des FPGAs peut prendre différentes formes, que ce soit pour configurer les ressources opératoires ou que ce soit pour configurer les réseaux de routage. Cependant, les FPGA de technologie anti-fusible ne sont configurables qu'une seule fois. Les seuls FPGA reconfigurables (configurables plusieurs fois) sont les circuits de technologie FLASH (non volatile) et les circuits de technologie SRAM (volatile et qui nécessite la sauvegarde externe dans une mémoire non volatile de la configuration). Les densités de configuration et la maîtrise des technologies ont permis l'émergence de composants de technologie mixte FLASH-SRAM.

Pour les FPGAs à technologie Flash-SRAM, la reconfiguration de l'architecture peut être mise en œuvre de plusieurs façons au cours de l'exécution de l'application. Elle peut intervenir une seule fois sans remise en cause durant l'exécution de l'application. Nous parlerons dans ce cas de **reconfiguration statique**, et les processus de reconfiguration et d'exécution de l'application sont distincts et clairement séparés dans le temps. A la mise hors tension, le contenu de la SRAM est perdu. La configuration doit donc être mémorisée dans

une mémoire de secours Flash PROM. A la mise sous tension, ou sur demande particulière, le contenu de la Flash PROM est copié dans la SRAM.

La **reconfiguration dynamique** permet d'optimiser la surface configurée dans le temps. Etant donné qu'il s'agit de modifier dans le temps uniquement une partie des éléments configurables, il faut nécessairement utiliser une architecture à reconfiguration partielle. Ici l'inconvénient vient qu'il est nécessaire de bien déterminer le partitionnement dans le temps de l'application afin de profiter de toute la surface du circuit. Il peut exister des problèmes de fragmentation comme sur les disques durs des ordinateurs. De plus, il faut correctement établir les communications entre les partitions. [14]

2.2.4- Les principaux atouts et applications de la technologie FPGA

Les avantages de l'utilisation des FPGAs sont :

- Sa performance : au niveau de la puissance de calcul, elle est supérieure à d'autre microprocesseur ;
- Une haute fiabilité du côté implémentation logicielle ;
- Une reprogrammation quasi-instantanée du circuit car une fois le programme validé, cela ne prend que quelques minutes à l'implémenter ;
- Un investissement rentable, malgré son coût, puisqu'il est reprogrammable ;
- Une maintenance à long terme.

On retrouve les FPGAs dans de nombreux domaines d'applications : calcul à haute performances, systèmes embarqués, télécommunications, routeurs de réseaux, réseaux sans fil, traitement du signal et des images, imagerie médicale, vision par ordinateur, cryptologie, dispositifs de sécurité, capteur biomédicaux, bio-informatique, prototypage de circuit, et bien beaucoup d'autre domaine de l'électronique et l'informatique.

2.3- CONCLUSION

La transformée de Fourier Rapide est l'outil principal utilisé dans le traitement numérique du signal. Les FPGAs sont aujourd'hui les circuits les plus évolués et les plus performant dans le domaine de la programmation embarquée. C'est pourquoi ils présentent un atout dans le domaine de traitement des signaux, qui est la partie fondamentale de notre mémoire de fin d'étude.

L'application de ce théorème est abordée dans la présentation de notre projet « SotfEye_2 » du chapitre qui suit.

CHAPITRE III :

SPECIFICATION TECHNIQUE DU PROJET « SoftEye_2 »

Ce présent chapitre reflète l'architecture et le fonctionnement du sondeur « SoftEye_2 », de l'émission du signal à la réception des échos, jusqu'au traitement de ceux-ci afin d'obtenir des mesures bathymétriques qu'on pourra visualiser dans un ordinateur.

La première version du projet SoftEye a vu le jour en 2013, réalisé par RAMILIARIVONY Andimaharo Johny et MIHARISOA Sandy Andrianjafy, promotion ELECTRONIQUE 2012-2013, qui est aussi leur projet de mémoire d'ingénieur. Pour cette deuxième version, nous avons apportés des améliorations sur les méthodes de détection, les qualités de sondes utilisées, l'utilisation de filtre anti-repliement passe-bas avant la conversion analogique numérique, et la technique de programmation de la carte FPGA.

3.1- SYNOPTIQUE DU PROJET

La figure 3.1 présente le schéma synoptique du sondeur SoftEye_2.

Il est important de bien préciser que tous les traitements de données se passent dans la carte FPGA mais pas dans l'ordinateur. Ce dernier a seulement pour rôle d'interface entre le logiciel de conception et programmation de la carte avec la carte elle-même. Autrement dit, ce n'est pas le processeur de l'ordinateur qui fait le traitement de signal, cette fonction est déjà embarquée dans le matériel.

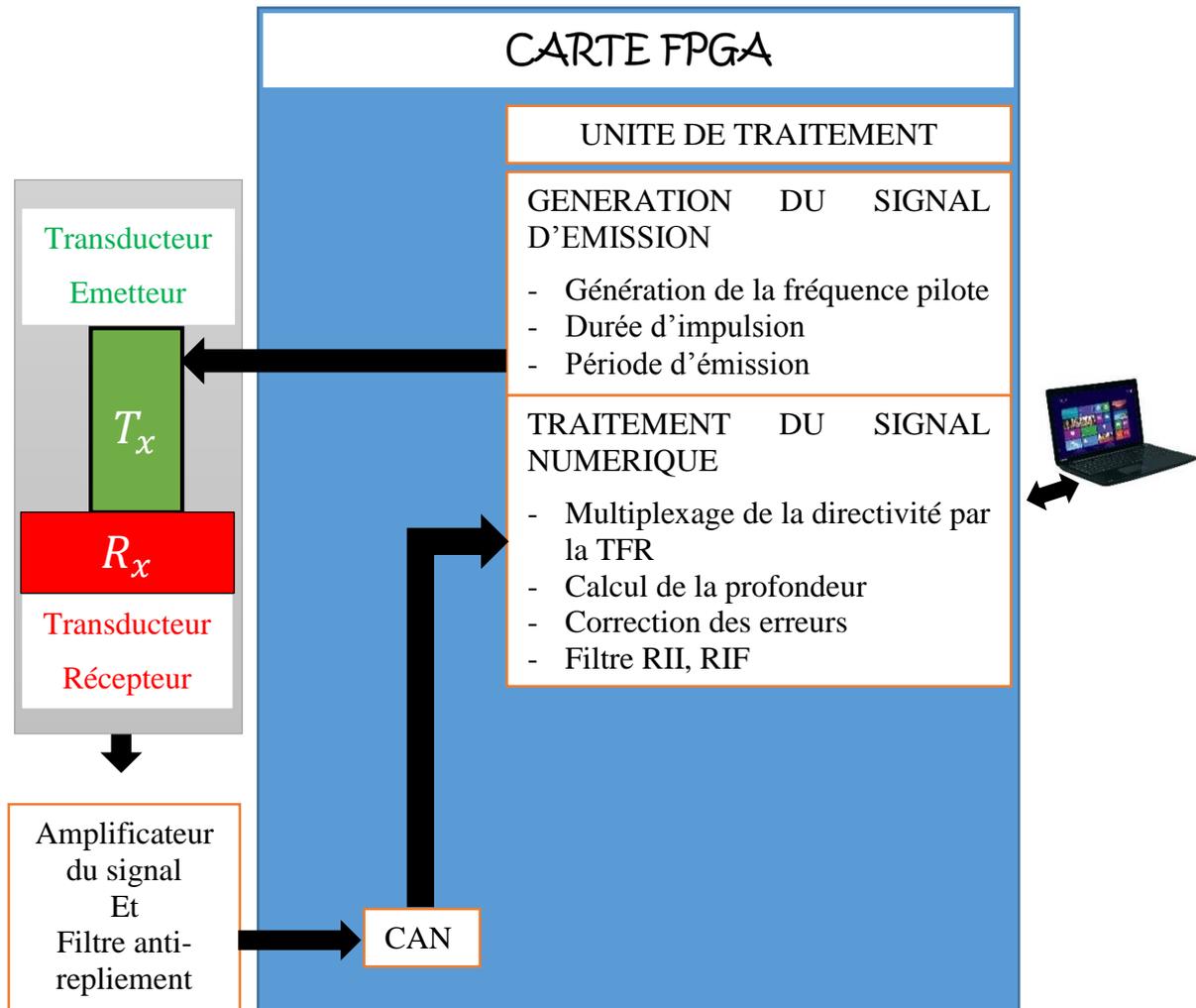


Figure 3.1 – Schéma synoptique du sondeur « SoftEye_2 »

3.2- TRANSDUCTEURS ET ANTENNES DU SMF de « SoftEye_2 »

Les transducteurs fonctionnent en convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique c'est-à-dire des impulsions électriques d'un générateur de signal en vibrations longitudinales qui se propagent dans la colonne d'eau en tant qu'une onde de pression. Et inversement, durant la réception, les ondes de pression sont converties en signaux électriques.

Les principales caractéristiques d'un transducteur sont les suivantes :

- Fréquence nominale d'utilisation : régime de résonance du transducteur, lequel est spécialisé dans une gamme donnée.
- Bande passante : largeur de bande de fréquences que le transducteur peut transmettre efficacement autour de sa fréquence nominale.

- Efficacité : qualité de la conversion électrostatique.
- Directivité : en émission c'est la répartition angulaire de l'énergie émise par le transducteur, et en réception la réponse électrique en fonction de la direction d'arrivée de l'onde acoustique. [16]

On peut regrouper plusieurs transducteurs pour former une antenne. Cela permet :

- d'augmenter la puissance émise et la puissance reçue,
- de contrôler la forme du diagramme de rayonnement des faisceaux.

La partie acoustique du « SoftEye_2 » est constituée de deux antennes : une antenne d'émission T_x (groupement des transducteurs émetteurs) et une antenne de réception R_x (groupement des transducteurs récepteurs). Les antennes sont placées dans la configuration croix de Mills, comme représenté à la Fig 3.2, afin d'obtenir une combinaison des diagrammes de directivité émission/réception créant des faisceaux fins lors de la formation de voies.

Les traitements d'antennes à l'émission et à la réception ont des buts différents.

- A l'émission, on se sert de la largeur de l'antenne pour former des secteurs ou de sa longueur pour dépointer la direction d'émission
- A la réception, on effectue une ou plusieurs formations de voies afin de pointer l'antenne dans la direction voulue.

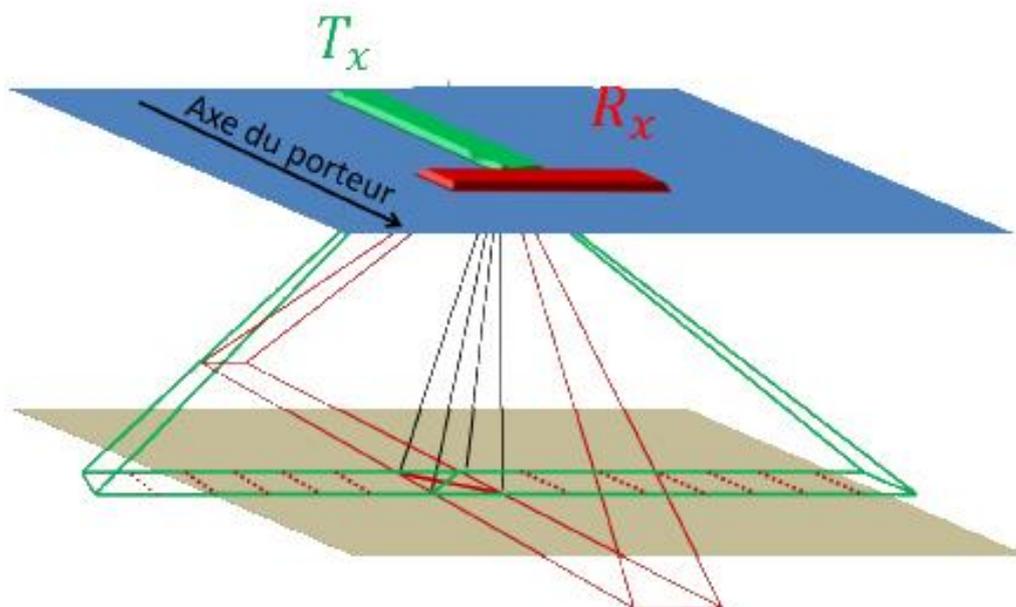


Figure 3.2 – Configuration des antennes du sondeur SoftEye_2 ;
en Rouge : antenne de réception et en Vert : antenne d'émission

L'antenne d'émission est composée de quelques projecteurs espacés d'une distance d , et celle de réception formée par plusieurs hydrophones avec une même distance d les séparant.

3.3- CARACTERISTIQUES DU SMF « SoftEye_2 »

Le sondeur « SoftEye_2 » émet des impulsions monochromatiques (Ping) sinusoïdes de fréquence f_0 (fréquence porteuse) $f_0 = 12 \text{ kHz}$, émises pendant une durée $\tau = 10 \text{ ms}$ (durée d'impulsion). Plus la durée d'impulsion est longue : plus la portée est grande, plus la résolution est faible. La longueur d'onde du signal λ est donnée par l'Eq 1.11 :

$$f_0 = c/\lambda \quad \text{donc,} \quad \lambda = c/f_0$$

Pour :

$$c = 1500 \text{ m/s}, f_0 = 12 \text{ kHz} \quad \text{on a :} \quad \lambda = 0.125 \text{ m.}$$

La répartition des faisceaux est équiangulaire, l'angle entre l'axe de deux faisceaux consécutifs est constant. La durée entre deux Ping successives est de 60 ms .

3.4- GENERATION DU SIGNAL A EMETTRE

A la place du navire qui porte le sondeur multifaisceaux sur sa coque, ici on utilise un moteur pas à pas pour propulser le sondeur « SoftEye_2 ». Ainsi, il se déplace à une vitesse constante, et le long d'un trajet donné, il envoie plusieurs Ping de 12 kHz .

La génération d'un Ping s'effectue par combinaison de circuit logique et une programmation en langage C. L'algorithme est représenté à la Fig 3.3.

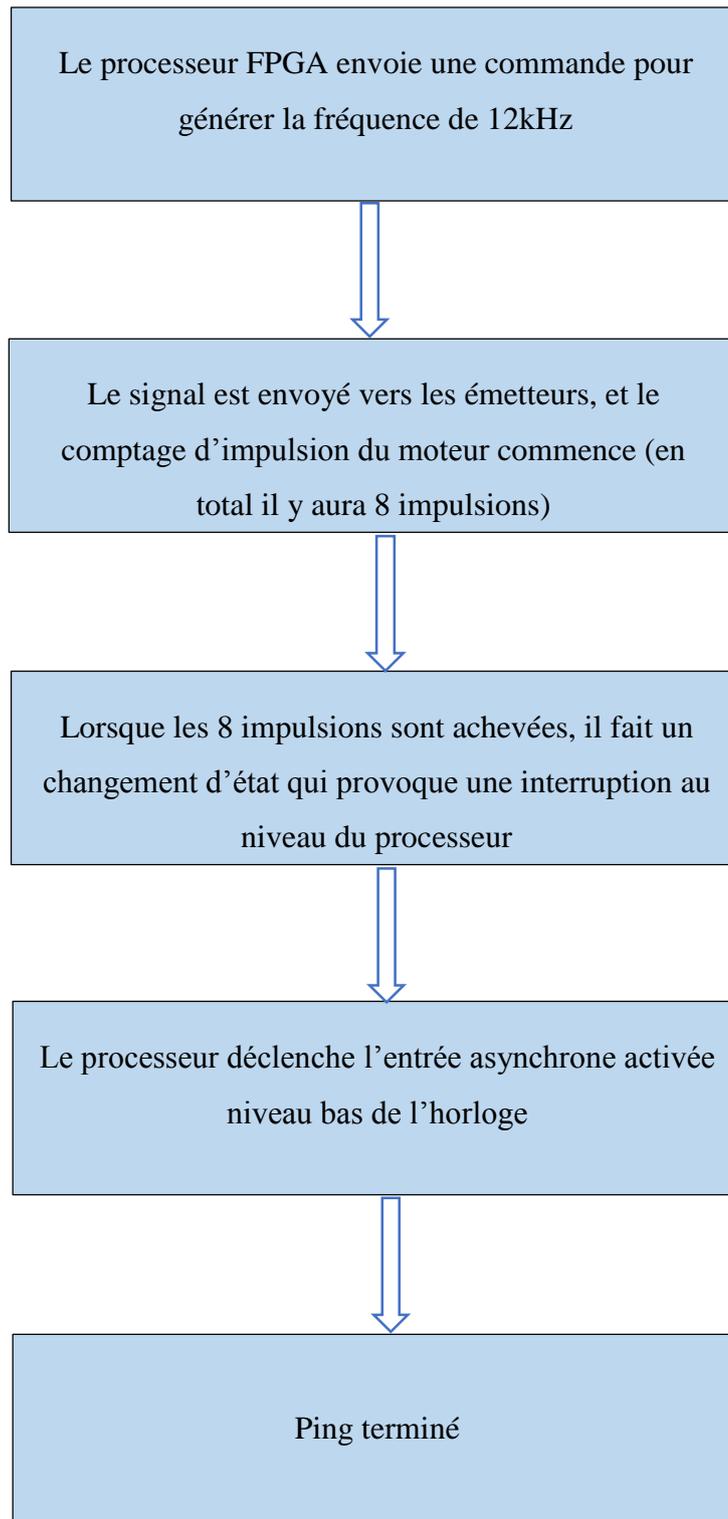


Figure 3.43 - Algorithme qui génère un Ping de 12 kHz

La figure 3.4 présente le schéma synoptique de la génération d'un Ping.

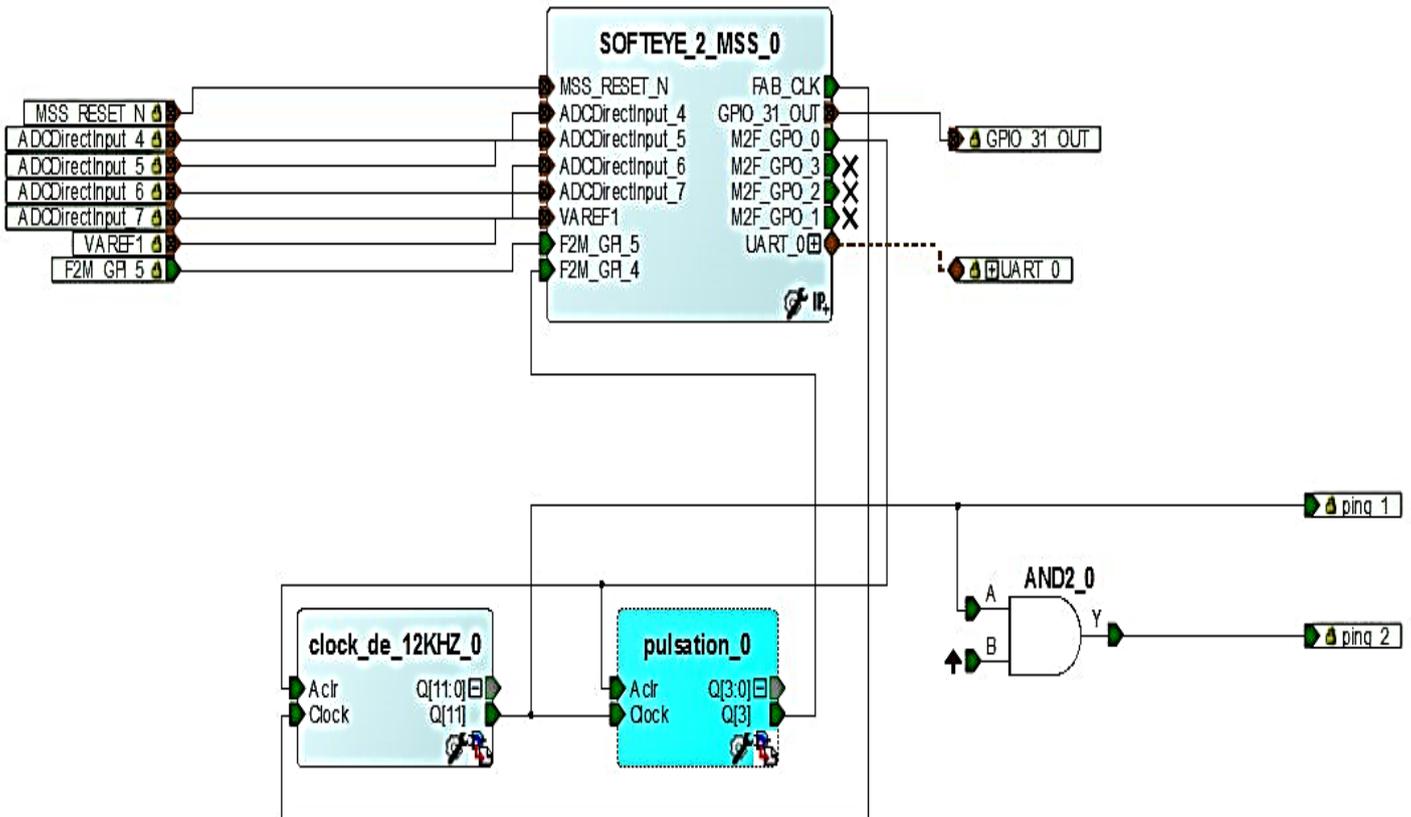


Figure 3.4 - Schéma synoptique de la génération d'un Ping de 12 Khz

3.5- RECEPTION DES ECHOS

Les caractéristiques du signal des échos reçus par ce tableau d'hydrophone dépendent de la caractéristique du fond de la surface insonifiée.

3.5.1- Interprétation des échos

Premier scénario, les fronts d'onde frappant le tableau d'hydrophones sont une série de lignes parallèles, du fait que c'est un fond plat.

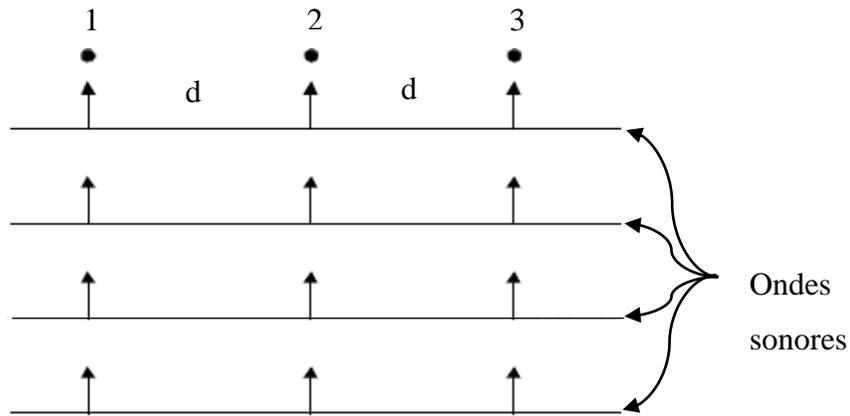


Figure 3.5 - Antenne d'hydrophone avec des échos perpendiculaire à son axe

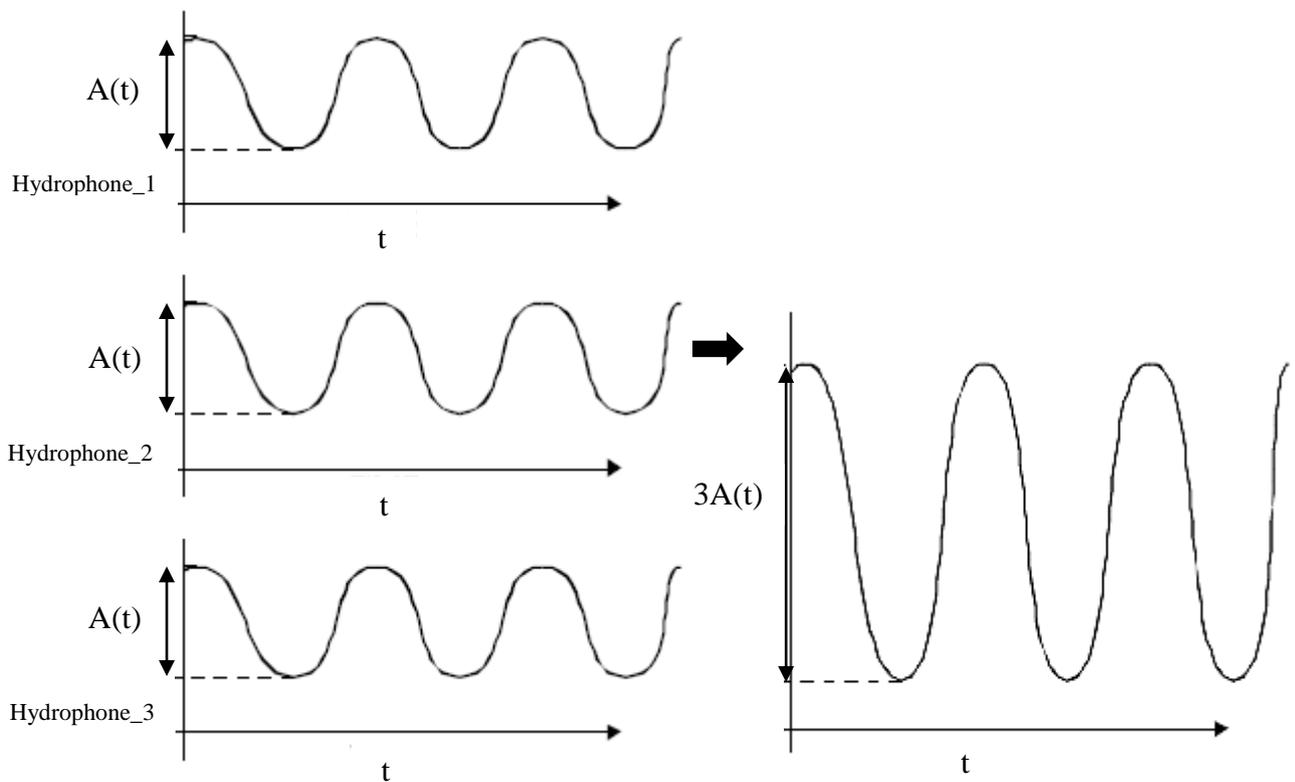


Figure 3.6 - Résultante des signaux enregistrés par chaque hydrophone, cas où $\Theta=0$

La somme des signaux enregistrés par les hydrophones est donc maximal due au fait que les signaux sont en phase. L'antenne des hydrophones est très sensible aux sons dans cette direction.

Deuxième scénario, les fronts d'onde arrivent sur ces récepteurs avec un décalage θ par rapport à la verticale. Ce sont des ondes réfléchies par les surfaces non planes dans l'eau.

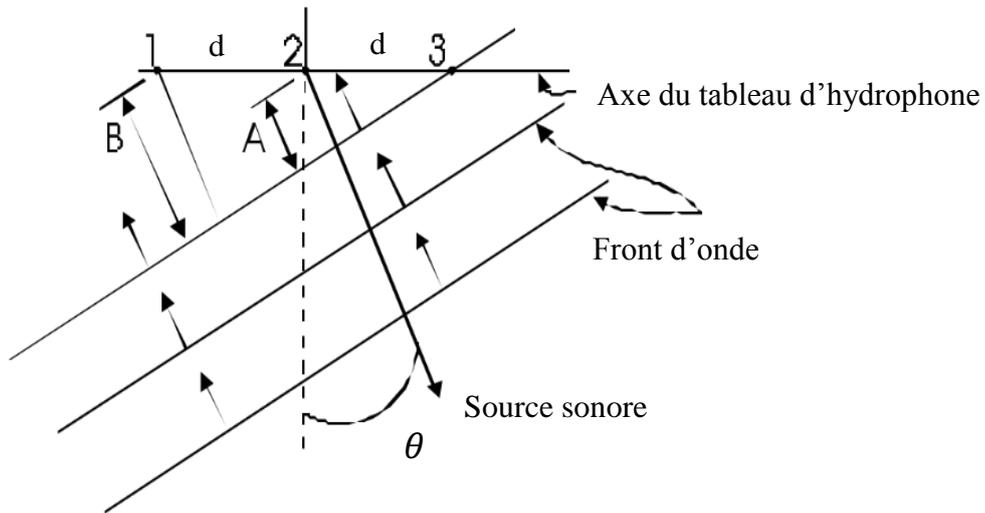


Figure 3.7 - Antenne d'hydrophone avec des ondes faisant un angle θ au large de la perpendiculaire

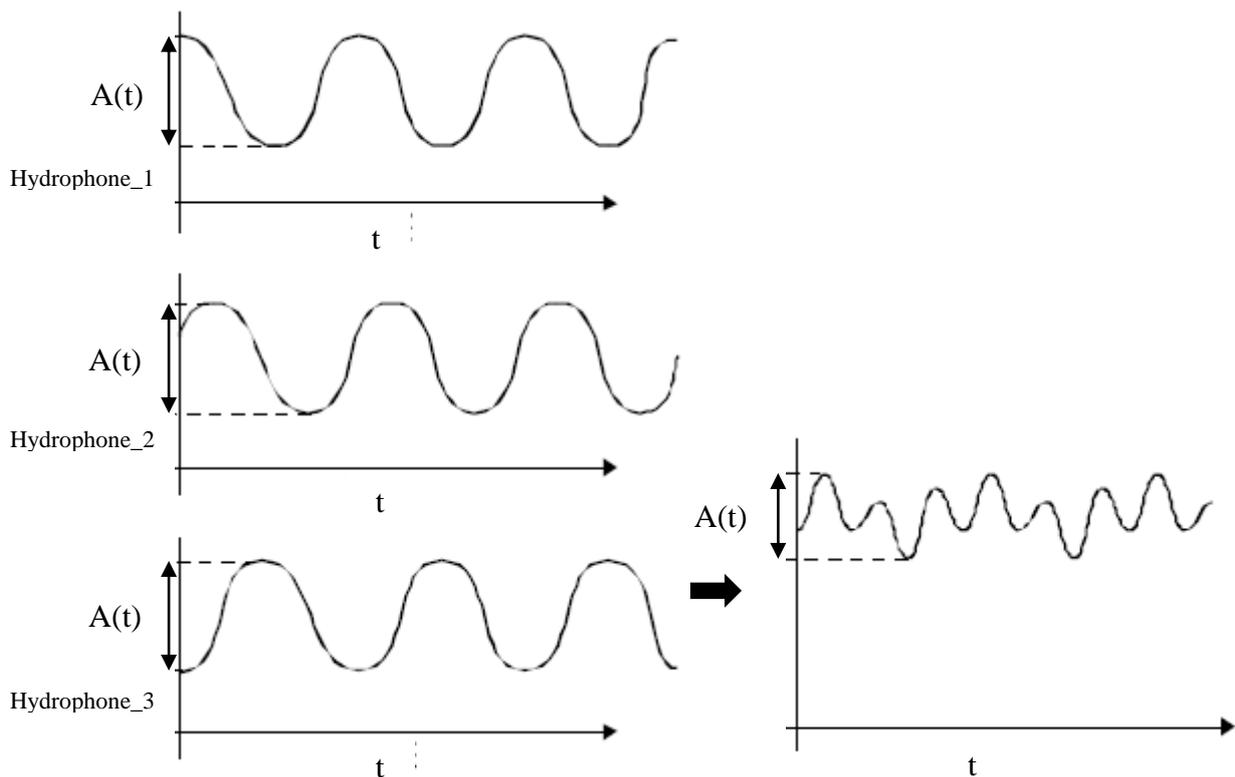


Figure 3.5 – Résultante des signaux enregistrés par chaque hydrophone, cas où $\Theta \neq 0$

Chaque récepteurs vont enregistrer des ondes de même amplitude mais déphasées de θ . La raison en est que les ondes sonores doivent parcourir des distances différentes pour atteindre chaque hydrophone. L'antenne des hydrophones n'est pas sensible aux sons de cette direction.

3.5.2- Différence de chemin d'accès et temps supplémentaires lors de la réception de l'écho

Pour un tableau d'hydrophone comportant N hydrophones (numéroté de 1 à N), les différences de chemin d'accès pour combiner correctement les signaux de chaque hydrophone sont donnés par :

$$D_i = i \times d \times \sin \theta \quad (3.1)$$

Avec d : distance séparant les hydrophones les uns des autres sur son tableau

θ : angle entre l'axe formé par les ondes et l'axe des récepteurs

$i \in [0, N - 1]$, pour $i = 0$, l'hydrophone considéré est le numéro N ; et pour $i = N - 1$, on parle celui du numéro 1.

Les temps supplémentaires requis par le front de l'onde d'atteindre chaque hydrophone sont donnés par la distance divisée par la vitesse locale du son c :

$$T_i = D_i/c = (i \times d \times \sin \theta)/c \quad (3.2)$$

3.6- AMPLIFICATION DU SIGNAL

A cause de la faible amplitude du signal reçus par le transducteur, on a besoin d'un amplificateur. Celui-ci est constitué de trois étages et à base de LM324, le premier étage, amplificateur de tension de gain de 40 dB, le second à un gain de 46,84 dB, et le troisième étage est un circuit de verrouillage. [17]

Cet amplificateur est déjà inclus dans la carte d'acquisition, présenté à la Fig 3.9.

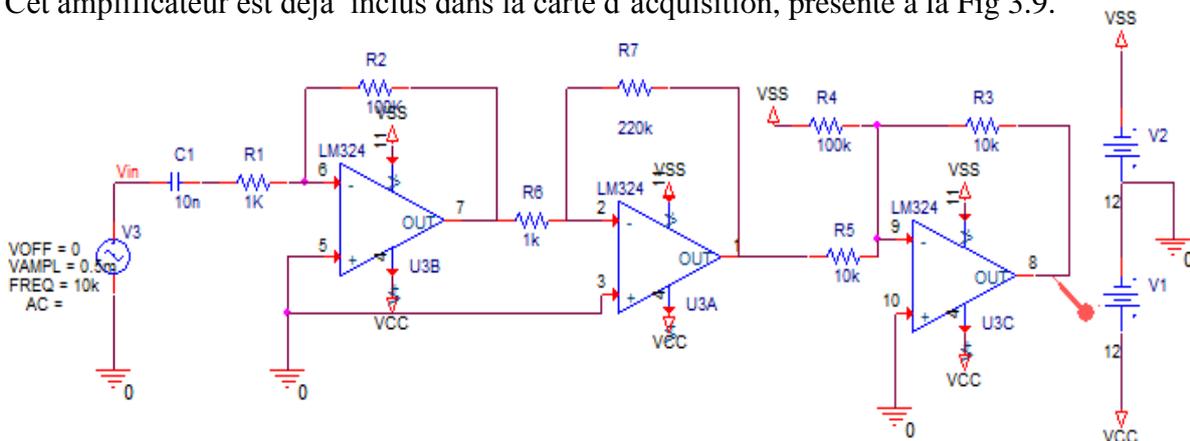


Figure 3.9 - Amplificateur de tension réalisé sous SPICE

3.7- FILTRE ANTI-REPLIEMENT

Pour une efficacité maximale, il faudra que le filtre soit d'ordre 2 au minimum. On utilise donc un filtre passe-bas de Butterworth d'ordre deux, à base d'un amplificateur opérationnel LM741. Le schéma de base est donné à la Fig 3.10, avec :

$$R_0 = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 254 \text{ pF}$$

$$C_2 = 125.5 \text{ pF}$$

La fréquence de coupure est $f_c = 89000 \text{ Hz}$.

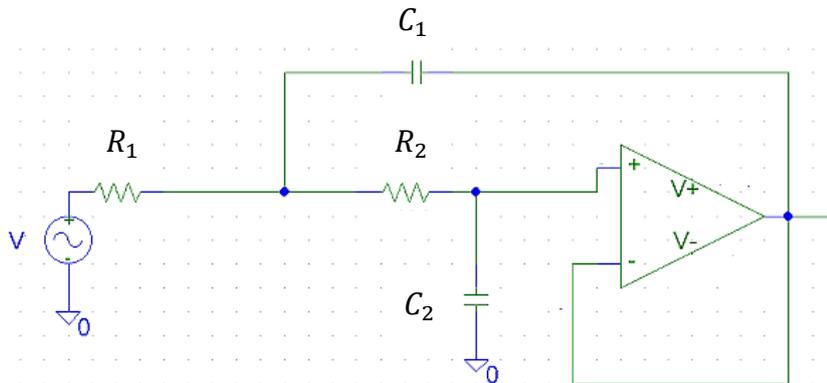


Figure 3.10 - Circuit de base du filtre anti-repliement à base de LM741 par Schematic du Pspice

3.8- CONFIGURATION DU MODULE ADC - récepteur

Les signaux issus des tableaux d'échantillonnage sont convertis en signaux numériques par le biais du module CAN intégré sur le FPGA, avec les caractéristiques suivantes :

- Tension de référence 2.56 V
- Fréquence d'échantillonnage 6.25 MHz
- Résolution : 10 bits

La figure 3.11 montre la configuration de ce module, ainsi que l'affectation des ports sur la carte de développement.

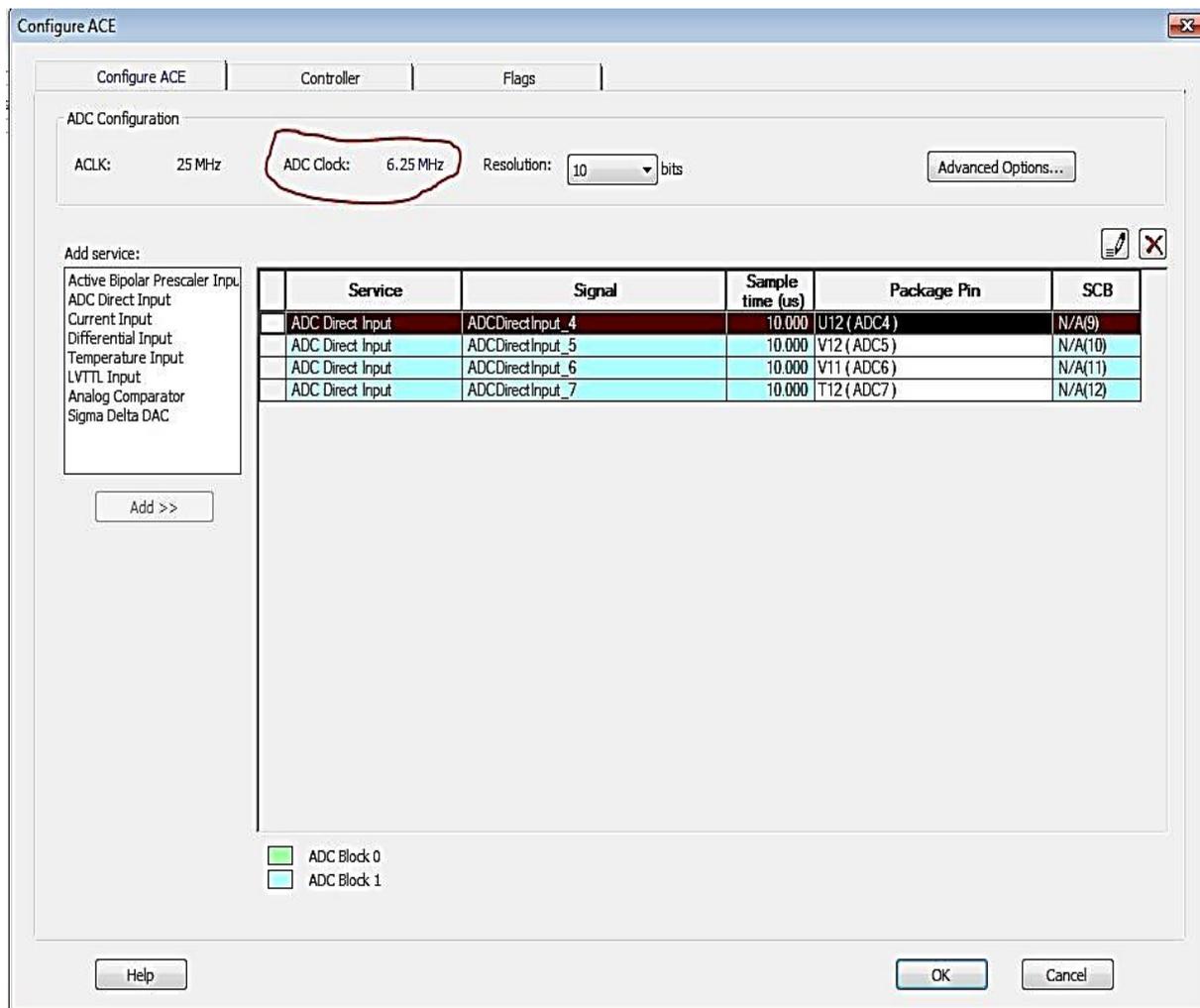


Figure 3.11 - Configuration matérielle du module CAN

3.9- TRAITEMENT DU SIGNAL NUMERIQUE

3.9.1- Multiplexage de la directivité

La sensibilité de la réception à un angle particulier se fait seulement par l'interprétation des données enregistrées, les récepteurs ou hydrophones restent immobiles. En changeant le processus de traitement, les mêmes hydrophones peuvent être orientés pour observer n'importe quelle partie des angles. De cette façon, un ensemble d'hydrophone peut être employé pour examiner les échos d'un simple Ping à des endroits différents.

Chaque hydrophone captent des signaux sinusoïdaux d'amplitude $A(t)$ variable, de fréquence f accordée à la fréquence de l'émetteur et à temps continu. La mesure instantanée de l'un de ces signaux est donnée par :

$$S(t) = A(t) \cos(2\pi ft) \quad (3.3)$$

Et $\phi(t) = 2\pi ft$: la phase du signal au temps t ,

Alors $S(t) = A(t) e^{j\phi(t)}$

En utilisant un CAN sur chaque récepteur, les signaux deviennent des signaux à temps discret, qui doivent être conforme au théorème de Shannon et à la possibilité du système même. La configuration étant établie antérieurement, l'expression du signal $S_i(\theta)$, d'amplitude A_i , relevé par chaque hydrophone suivant un angle θ considéré est :

$$S_i(\theta) = A_i \exp\left(j\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} i \times d \times \sin \theta\right)\right) \quad (3.4)$$

Où $\frac{2\pi}{\lambda} i \times d \times \sin \theta$: la différence de phase causée par des chemins d'accès différentes D_i .

d : distance entre chaque hydrophone.

Par sommation des signaux $S_i(\theta)$ pour tous les hydrophones, une directivité du faisceau ajusté à l'angle θ choisi a été obtenue comme le montre la Fig 3.12.

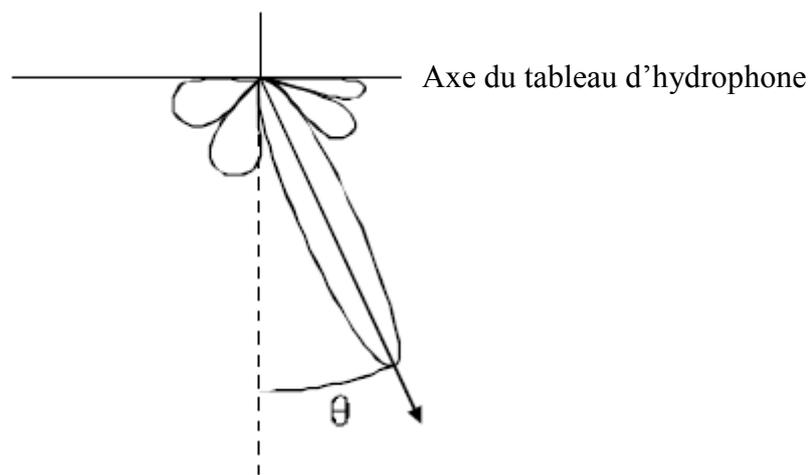


Figure 3.12 - Directivité associée à la configuration des hydrophones et décalage du temps T_i .

Ce processus est réitéré suivant chaque directivité θ_k pour obtenir des faisceaux orientés.

$$S_i(\theta_k) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i \exp(j(\frac{2\pi}{\lambda} i d \sin \theta_k)) \quad (3.5)$$

Où $k = \{0, 1, \dots, N - 1\}$

N : nombre du réseau d'hydrophone.

Ces calculs doivent être remplis pour chaque tranche de temps en temps réel, avant l'arrivée des données des tranches horaires suivantes. Ce mécanisme nécessite un temps de calcul très court. C'est pourquoi, on va recourir à l'utilisation de la TFR pour la création des faisceaux de direction. Son équation est la suivante :

$$F_k = \sum_{i=0}^N h_i \exp(j(\frac{2\pi}{N} ik)) \quad (3.6)$$

Où $k = \{0, 1, \dots, N - 1\}$

Il s'agit d'une similitude utile si nous faisons les substitutions suivantes :

$$F_k \equiv S_i(\theta_k)$$

D'où ,
$$\frac{2\pi}{N} ik = \frac{2\pi}{\lambda} i d \sin \theta_k$$

A temps discret, les faisceaux dont la direction est portée par θ_k , seront également discrets vérifiant la relation :

$$\theta_k = \sin^{-1}(\frac{\lambda}{d} \times \frac{k}{N}) \quad (3.7)$$

Où θ_k : angle formé par la verticale de l'axe du sondeur (de T_x) avec la directivité du faisceau

d : espacement entre deux hydrophones voisins

λ : longueur d'onde du signal utilisé

$k \in [-N/2; (N/2) - 1]$, N étant le nombre d'hydrophones (y compris les hydrophones virtuels).

Après la TFR, chaque tranche de temps contient des N mesures d'amplitudes A_1, A_2, \dots, A_N , chacun associée à un faisceau orienté d'angle $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$.

Toutes les données pour un cycle de Ping unique qui se dégage de la transformation de TFR sont représentées comme une matrice. Le code source de la TFR est représenté à l'annexe 5 L'algorithme des filtres RII et RIF est inclus dans ce code.

3.9.2- Compensation des mouvements du porteur face aux vagues

Les mouvements du porteur sont mesurés en direct par une centrale d'attitude. On stocke les vitesses et positions angulaires liées aux trois axes du référentiel du bateau (voir Fig 1.8) :

- Le lacet $\dot{\phi}$
- Le roulis $\dot{\theta}$
- Le tangage $\dot{\psi}$

Ces mesures servent à stabiliser le système en temps réel et à effectuer les post-corrrections sur la bathymétrie fournie par le sondeur. La figure 3.13 présente les mouvements du porteur.

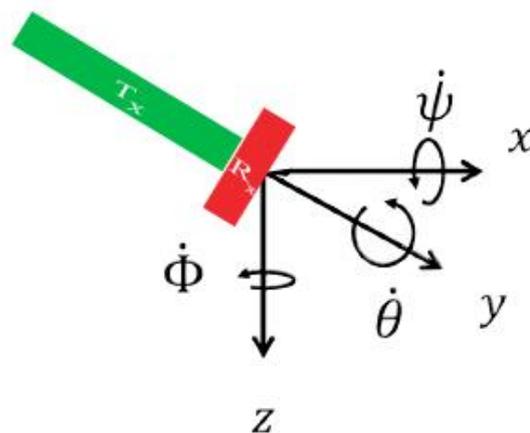


Figure 3.13 - Mouvements du porteur ; $\dot{\psi}$: tangage, $\dot{\phi}$: lacet, $\dot{\theta}$: roulis

L'effet de rotation sur chacune de ces directions est illustré dans la Fig 3.14 suivante. Ces mesures des angles sont prises en compte lors de la calcul de l'angle θ_k pendant le traitement du signal.

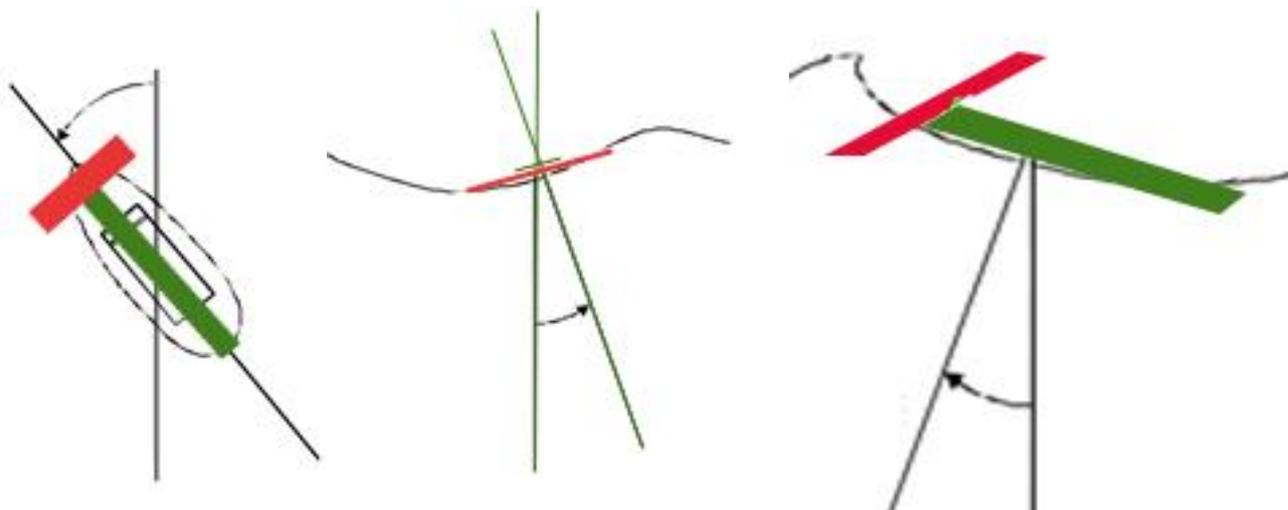


Figure 3.14 - Effet de rotation sur chacune des trois axes référentiels du porteur

3.9.3- Calcul de la profondeur

La profondeur du fond se calcule comme en sondeur mono-faisceau sauf que l'angle θ est pris en considération, selon la Fig 3.15 ci-dessous. Cet angle est celui formé par la verticale de l'axe du sondeur avec la directivité du faisceau considéré (pour plusieurs faisceaux, c'est le déphasage θ_k).

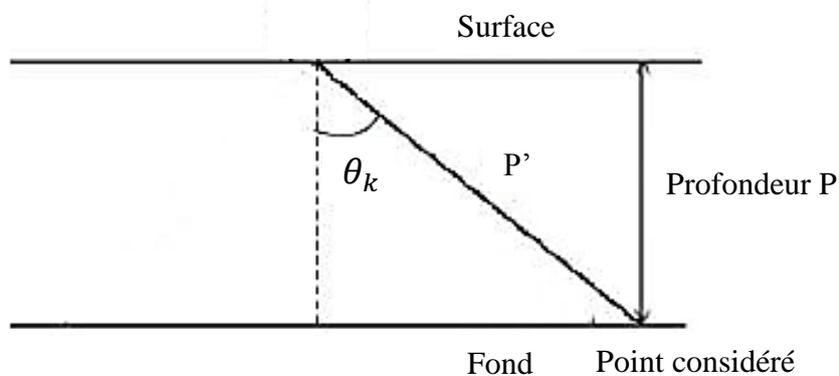


Figure 3.15 - Schéma illustratif du calcul de la profondeur avec l'angle θ_k

La profondeur se calcule par

$$P = P' \cos \theta_k \quad (3.8)$$

Avec $\theta_k = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{d} \times \frac{k}{N}\right)$ (3.7)

$P' = c \times \Delta t / 2$: distance parcourue par l'onde pendant le temps $\Delta t / 2$.

Δt : temps de parcours émetteur- Point considéré- récepteur à l'angle θ par l'onde.

c : célérité du milieu aquatique.

3.10- CONCLUSION

Cette spécification technique nous a montré la possibilité de réaliser un SMF bathymétrique à l'échelle laboratoire à partir des transducteurs. Le FPGA sert d'outil de base pour l'émission et les traitements de signal, pour aboutir à des mesures bathymétriques.

Le chapitre suivant décrit la réalisation du projet et les résultats obtenus suite à des levés bathymétriques d'une petite surface immergée.

CHAPITRE IV :

REALISATION DU PROJET « SoftEye_2 » ET APPLICATION

L'architecture générale du projet « SoftEye_2 » est présentée à la Fig 4.1 qui suit.

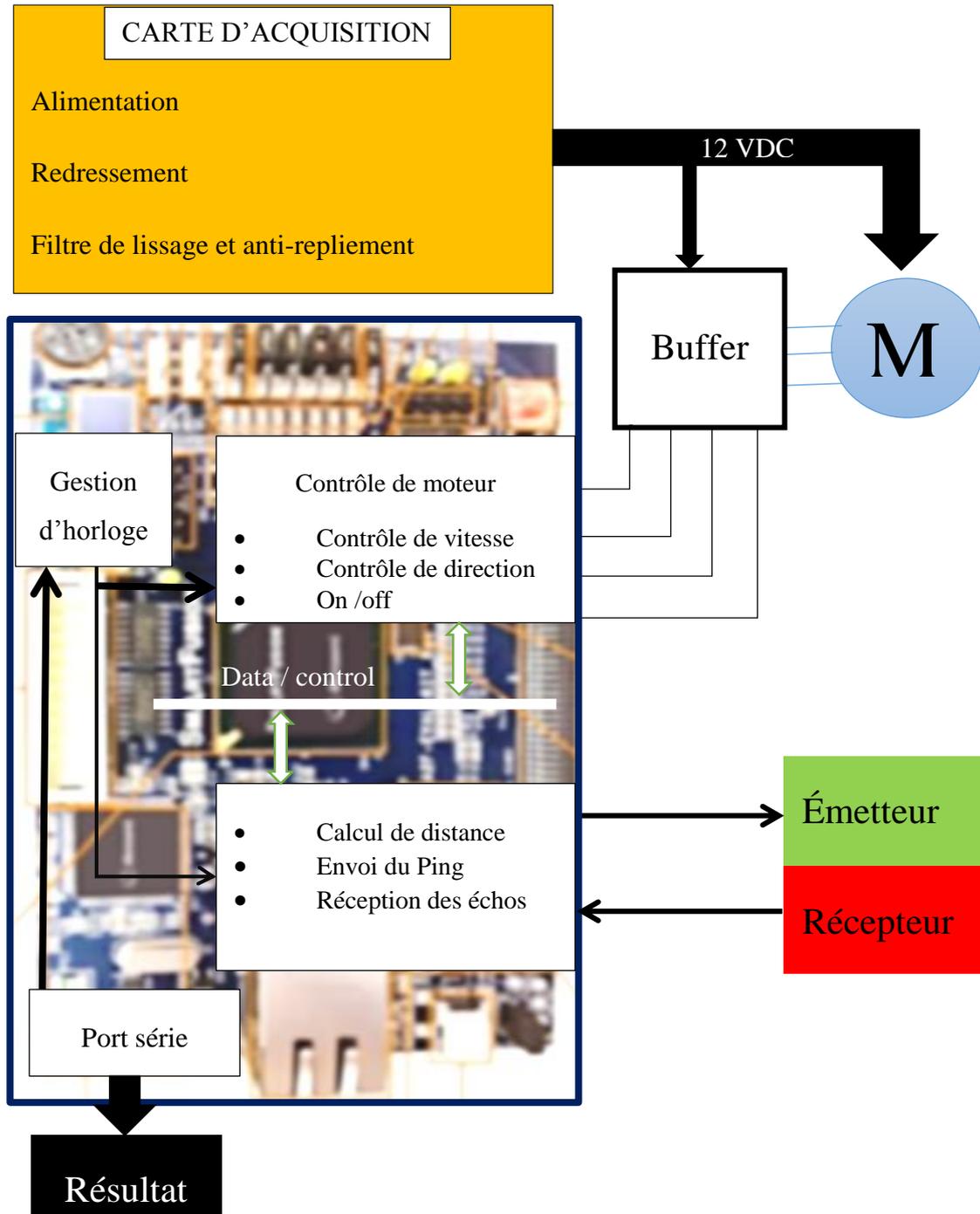


Figure 4.1 - Architecture générale du projet « SoftEye_2 »

4.1- PRESENTATION DU SYSTEME D'ACQUISITION

Notre projet est réalisé à l'échelle laboratoire pour le système d'acquisition et le traitement des données reçus. Les matériels utilisés sont :

- Une cuve transparente de volume $30\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, comme bassin contenant de l'eau salée,
- Un moteur pas à pas servant le système de propulsion à la place du bateau
- Une antenne de projecteur composée de deux (2) buzzers piézoélectriques,
- Une antenne de réception composée de quatre (4) microphones à électrets,
- Une carte d'acquisition contenant le circuit de l'amplificateur et du filtre,
- Une carte FPGA SmartFusion Evaluation Kit A2F-EVAL-KIT-2 de ACTEL,
- Une interface de communication USB.

La figure 4.2 montre la vue générale du projet.

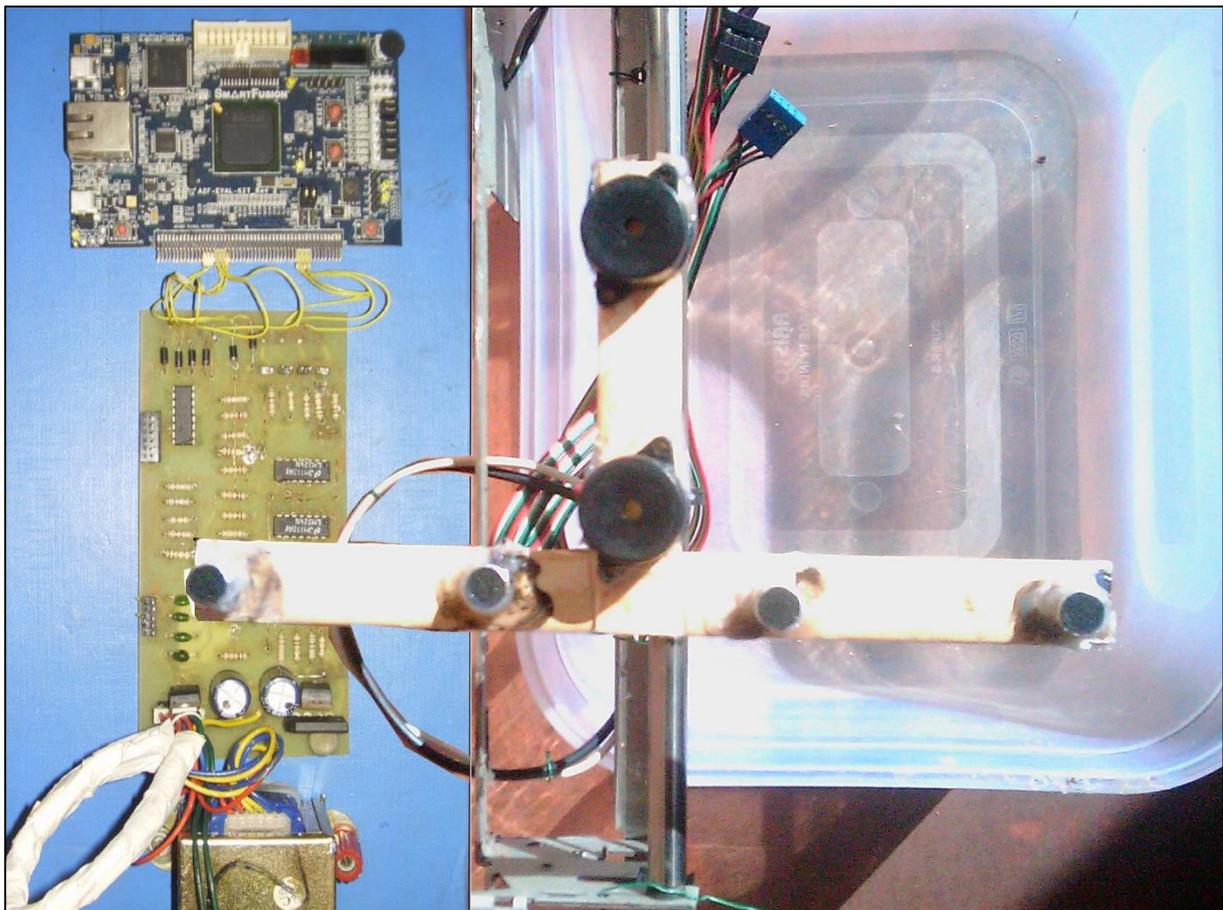


Figure 4.2 - Vue générale du projet

4.1.1- Le système de propulsion

La propulsion est assurée par un moteur pas à pas STP-42CI48SE contrôlé par la commande implantée dans le circuit FPGA et par intermédiaire de circuit buffer ULN2003.

Le plan de commande se présente comme l'architecture indique par la Fig 4.3.

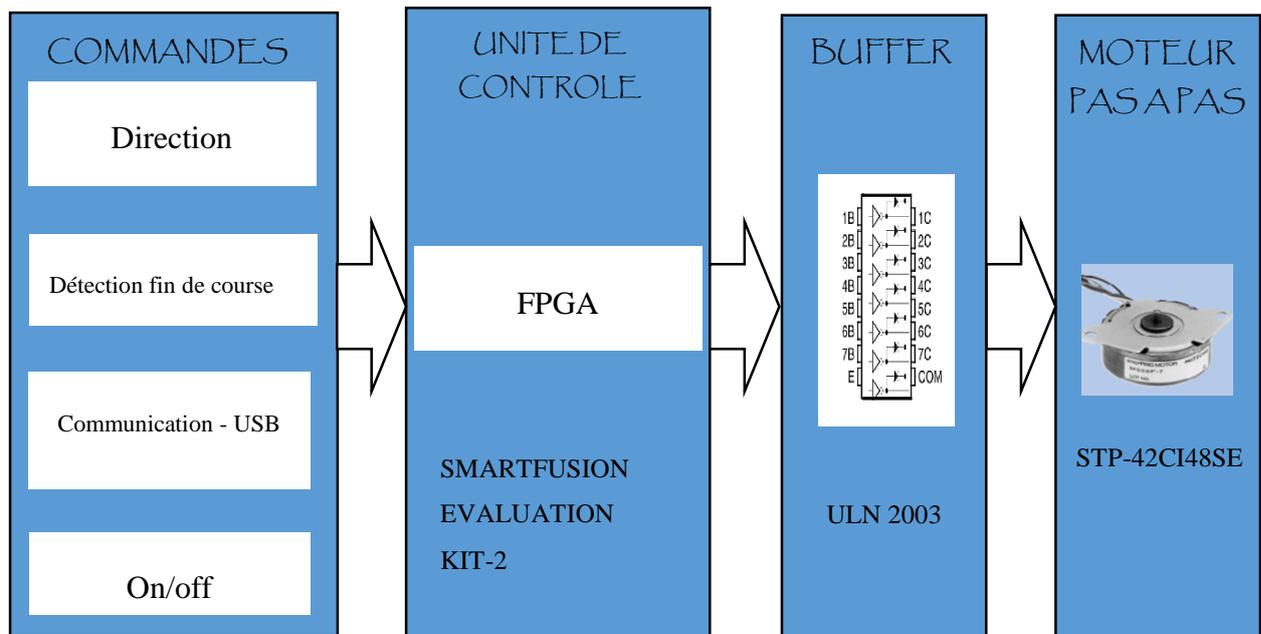


Figure 4.3 - Système de propulsion

Le diagramme simplifié de la Fig 4.4 suivante illustre l'ordonnement des phases dans le sens de rotation du moteur. Le mode « half step » est utilisé pour avoir plus de précisions.

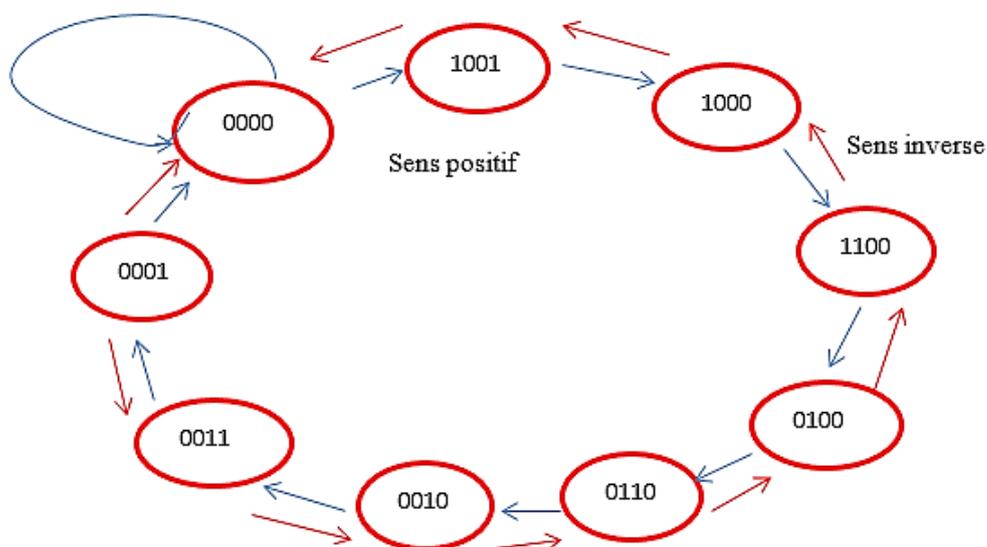


Figure 4.4 - Diagramme d'état du moteur en half-step

Les codes de couleur pour le moteur pas-à-pas STP-CI4248SE sont définies par :

- Phase A : rouge
- Phase B : jaune - bleu
- Phase C : blanc - rouge
- Phase D : bleu
- Com : verte

La séquence de ces quatre (4) phases permet de faire tourner le moteur dans le sens d'une aiguille d'une montre (sens positif) et inversement (sens inverse).

a- Moteur pas à pas STP-42CI48SE

Le moteur pas-à-pas STP-42CI48SE est un dispositif électromécanique qui convertit un signal d'entrée niveau logique en mouvement de rotation précis. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Courant nominal : 150 mA/phase
- Tension d'alimentation 12 VDC
- Angle : $7.5^\circ/\text{étape}$
- Unipolaire
- Nombre de pins : 6

b- Buffer ULN 2003

Un circuit d'interfaçage ULN 2003 a été entrepris afin de commander le moteur et de prendre en charge l'alimentation des bobines du stator, car la commande des ordonnancements du moteur nécessite des signaux de commande de niveau logique 0 – 15 V. Or, les signaux de commandes délivrés par la carte FPGA sont de niveau logique TTL (0- 5V). Le dispositif contient sept (7) transistors de puissance bipolaire, monté en Darlington. Chacune des sorties est indépendamment contrôlable, le courant fourni sur chaque sortie ne doit pas dépasser 500 mA. Ce sont des sorties à collecteur ouvert. Dans ce projet, le circuit est implanté dans la carte d'acquisition. Quatre de ces sorties sont employées pour piloter les enroulements du moteur.

4.1.2- Les antennes du SMF « SoftEye_2 »

a- Les transducteurs émetteurs

L'émission est assurée par deux « buzzers piézoélectriques » 12 V, avec une fréquence d'émission 12 kHz, et espacé d'une distance d .



Figure 4.5 - Buzzer piézoélectrique

Les détails à propos des *buzzers* piézoélectriques sont vus en ANNEXE 2.

b- Les transducteurs récepteurs

A la place des hydrophones pour outils de réception, on utilise quatre capsules de microphones à électret délivrant un signal d'amplitude 5 mV.



Figure 4.6 - Capsule de microphone à électret

Les propriétés et principes de ce type de microphone se trouve aussi dans l'ANNEXE 2.

c- Arrangement des transducteurs

Les antennes d'émission et de réception sont placés dans la configuration « croix de Mills ».

Les *buzzers* sont espacé d'une distance : $d = \lambda/2$ (4.1)

donc, pour $\lambda = 0.125 m$, on prend $d = 6 cm$

Cette même distance est celle séparant les microphones à électret.

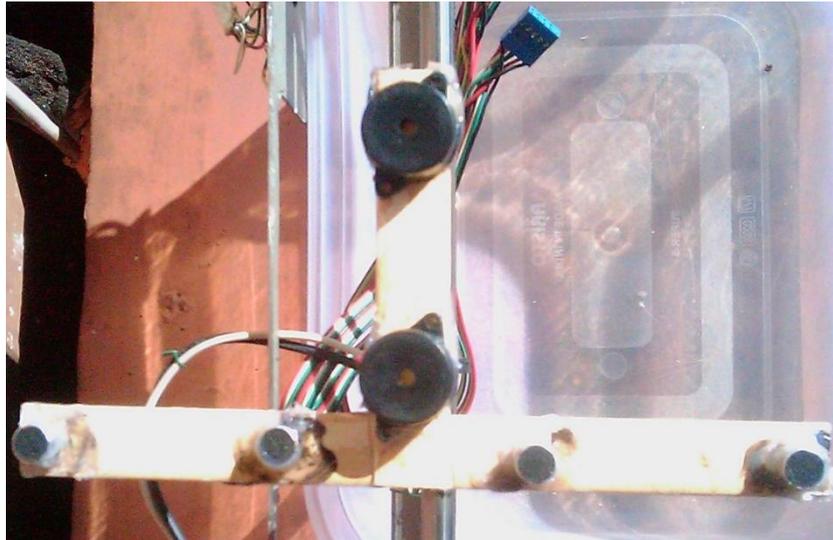


Figure 4.7 - Agencement des antennes des émetteurs et récepteurs

4.1.3- La carte d'acquisition

Elle sert d'interface entre les antennes de transducteurs et l'unité de contrôle FPGA, et comporte les modules suivants :

- Une source d'alimentation
- Un module de redressement
- Un module de filtre anti-repliement passe pas
- Un module d'amplification
- Un module de Buffer

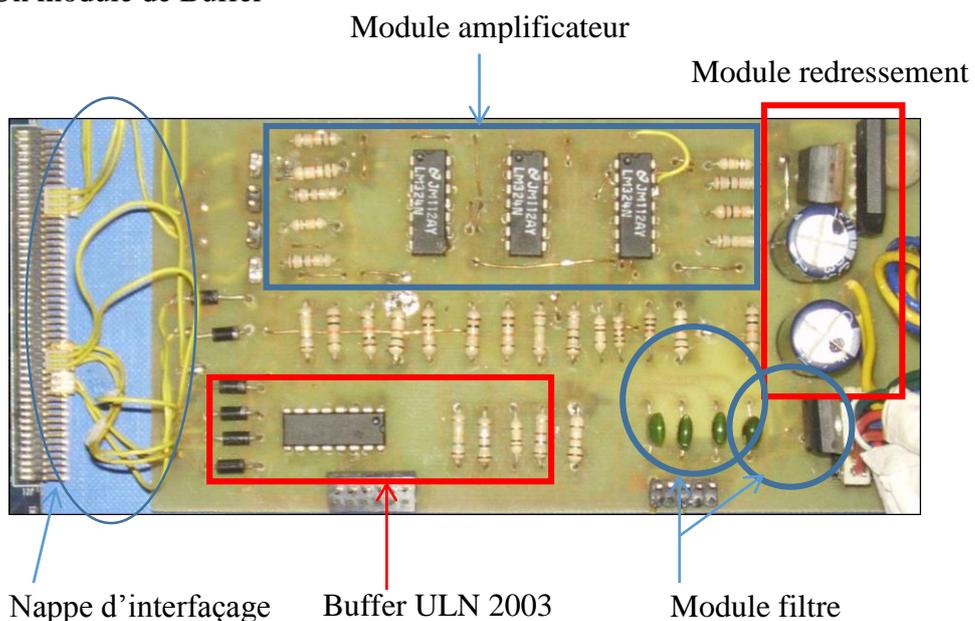


Figure 4.8 - Schéma de réalisation de la carte d'acquisition

4.1.4- La carte SmartFusion Evaluation Kit A2F-EVAL-KIT-2 de ACTEL

Cette carte, intègre le FPGA Smart Fusion crée par Microsemi. Il permet de développer plusieurs applications : processeur embarqué, traitement de signal mixte. Tous les composants principaux utilisés sur la carte consomment moins d'énergie. Aussi, incluse sur la carte d'évaluation une interface d'Ethernet et d'USB-to-UART pour la communication avec la carte, qui peut être mise en application pour la gestion du système. La carte peut être alimentée par USB ou une alimentation 5 V/DC via le Jack Wall. Lorsque 85 % des entrées/sorties sont utilisées, une alimentation externe doit être recommandée pour être dans la règle de la spécification USB. Un chip appelé Low-cost programming Stick permet la programmation du FPGA SmartFusion A2F200M3F-FGG484 embarqué.

Le kit est soutenu par Libero SoC (System on Chip), le logiciel de conception de Microsemi qui comprend SoftConsole IDE (Integrated Development Environment) de logiciels GNU (Gnu is Not Unix), basé sur Eclipse. Les informations concernant cette carte sont dans l'ANNEXE 4. [18]

La Figure 4.9 nous donne l'aperçue globale de la carte.

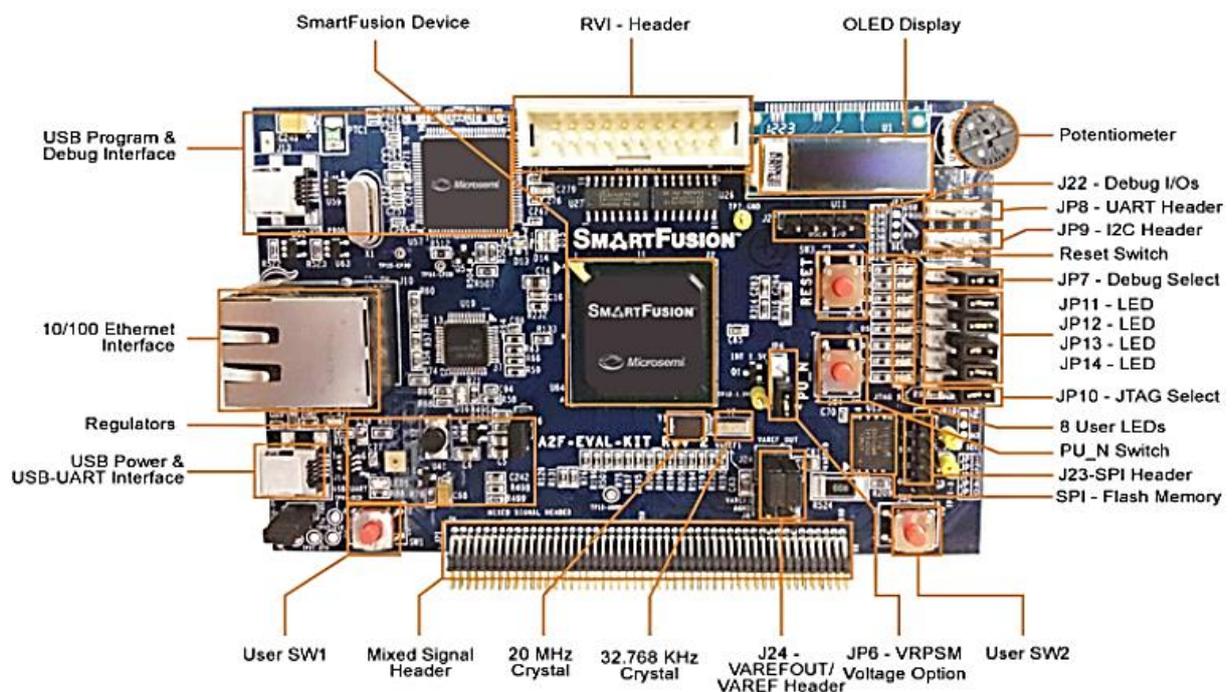


Figure 4.9 - Carte SmartFusion Evaluation Kit A2F-EVAL-KIT-2

4.1.5- Coût du projet

Du point de vue économique, la réalisation du SMF bathymétriques « SoftEye_2 » est estimé à 1 153 500 Ar, comme présenter dans le Tableau I suivant.

Tableau I : Coût du projet

MATERIEL	PRIX
Carte FPGA	1 118 500 Ar
Antenne d'émission	5 000 Ar
Antenne de réception	10 000 Ar
Carte d'acquisition	12 000 Ar
Accessoires : cuve, fils, ...	8 000 Ar
TOTAL	1 153 500 Ar

4.2- IMPLEMENTATION LOGICIEL

4.2.1- Logiciel de développement Libero SoC 11.5 (System On Chip) et SoftConsole v3.4

L'implémentation des matériels dans l'unité de control FPGA Smartfusion Evaluation Kit par le logiciel Libero SoC se déroule suivant les étapes suivantes :

a- « Desing Creation »

Deux modes de création du design sont possibles, soit en utilisant un éditeur de texte HDL (Hardware Description Language) avec l'outil « HDL Editor » pour le langage VHDL), soit un éditeur graphique « Smart Design » qui donne un canevas permettant d'instancier les composants, c'est l'approche de conception par schéma.

b- Simulation avec ModelSim

Le logiciel *ModelSim* permet d'instancier les modules à tester et de leur assigner des valeurs de signaux d'entrée, il est déjà intégré dans le Libero Soc 11.5, pour simuler le

fonctionnement de conception, Libero Soc créera un testbench qui est indépendant de la méthode utilisée (HDL Editor ou Smart Design) et il appelle automatiquement le ModelSim lors d'étape de simulation.

c- « Place and Route »

Cette étape permet de définir les contraintes, à savoir :

- La stabilité de l'horloge
- Input/Output compatibilité : TTL, CMOS
- Assignements des ports Input/Output, les contrôles, l'horloge
- Consommation en énergie

d- « Programming »

Cette phase consiste à programmer la conception précédente dans la carte FPGA.

e- Programming Software

L'implémentation du processus du projet est assurée par le logiciel **SoftConsole IDE 3.4**, ce programme est en langage C.

Le flot de conception par le Libero Soc est représenté par la Fig 4.10 ci-après.

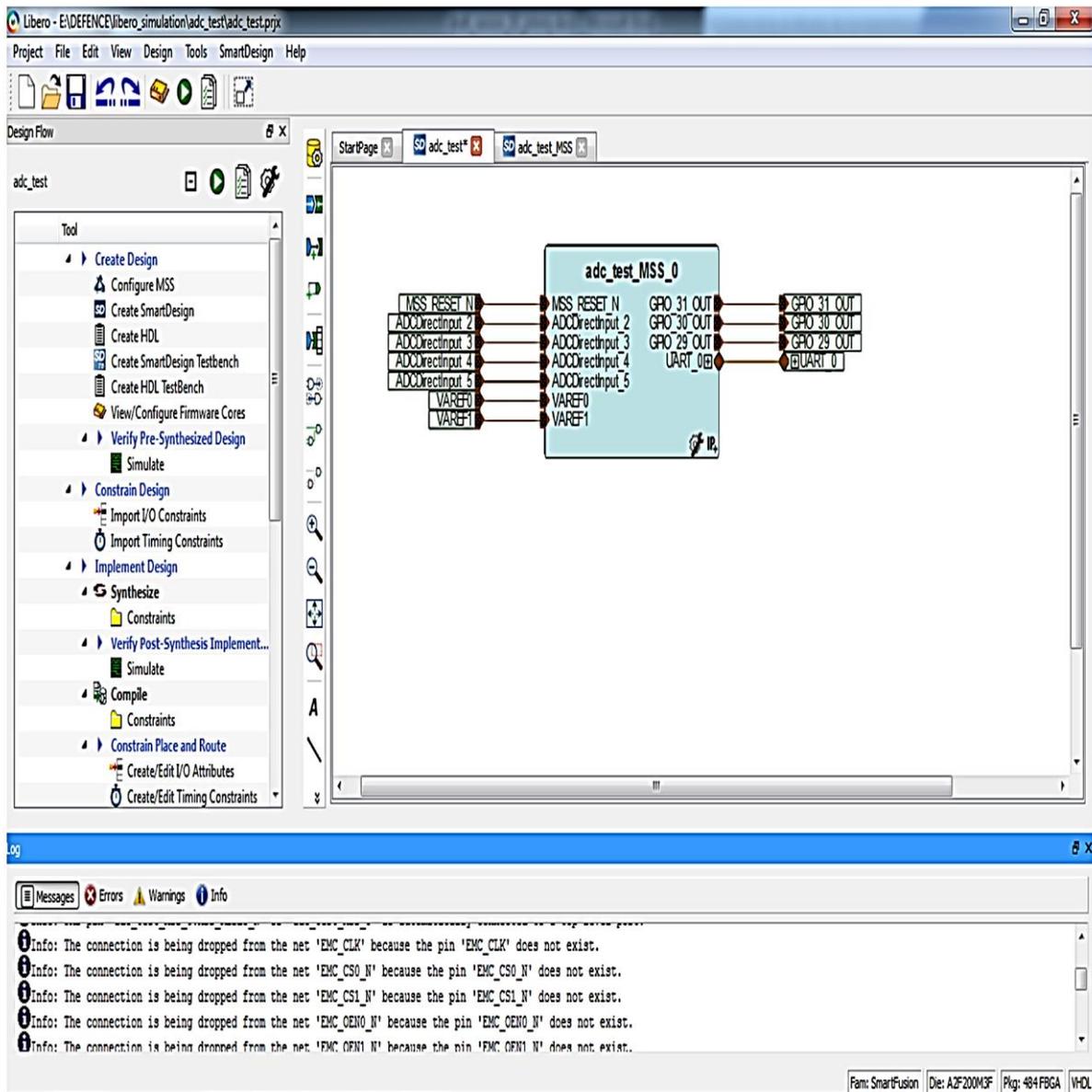


Figure 4.10 - Flot de conception sous Libero Soc 11.5

4.2.2- Programmation du processus de Traitement Numérique de Signal

Il y a deux étapes de programmation à faire pour la transcription du TNS dans la carte FPGA :

- Programmation en langage VHDL sous Libero Soc pour attribuer la variable entrée/sortie à des ports physiques.

- Programmation en langage C sous SoftConsole pour le comportement du processus.

a- Transcription de la TFR dans le FPGA

L'implémentation de la TFR s'opère uniquement au niveau de la programmation, il est développé en langage C utilisant l'algorithme RADIX-2. L'algorithme présente la structure suivante : (détails en ANNEXE 5)

- Un fichier « arithmetic_cplx.h » qui contient les calculs du nombre complexe élémentaire avec les fonctions :

- `complex complex_from_polar(double r, double theta_radians);`
- `double complex_magnitude(complex c);`
- `complex complex_add(complex left, complex right);`
- `complex complex_sub(complex left, complex right);`
- `complex complex_mult(complex left, complex right);`

- Un fichier « fft.h » pour la déclaration des fonctions utiles pour le calcul de la FFT

- `complex* FFT_simple(complex* x, int N);`
- `void FFT_simple_v2(uint16_t* x, uint16_t* y, int N);`

- Un fichier « fft.c » qui calcule la fonction FFT-butterfly et le twiddle factor.
- Un fichier « mss_uart.c » pour la programmation de la connexion entre l'ordinateur et le port série de la carte afin qu'on peut traiter les résultats dans d'autres logiciels pour voir concrètement les cartes bathymétriques.
- Un fichier « main.c » qui renferme la fonction principale *main* qui retournera la valeur 0.

Pour « SoftEye_2 », on calcule la FFT à 16 points, c'est-à-dire 16 hydrophones dont 12 sont virtuels et 4 réels (les 4 microphones).

b- Transcription du filtre RIF et RII

Le filtrage après la FFT se fait par la fonction « filter », détaillé plus clairement en ANNEXE C.

4.2.3- Implémentation du comportement du système de propulsion dans le FPGA

Modélisation GRAFCET (GRAPhe Fonctionnel de Commande des Etapes et Transitions) du système

Avant de passer au développement d'algorithme sous le logiciel Libero soc, il est nécessaire de modéliser graphiquement le processus de contrôle du moteur. En plus de la description de la séquence des commandes du moteur, le système de modélisation « GRAFCET » a été pris pour faire apparaître les caractères séquentiels du système de propulsion et les étapes élémentaires qu'il doit effectuer pendant l'opération. (ANNEXE 6). La figure 4.11 ci-après décrit la séquence de commande du moteur.

L'interprétation du GRAFCET contribue à:

- A la mise en marche et arrêt de l'exploitation ;
- Au multiplexage de la vitesse de rotation ;
- A la détection du sens de rotation
- A l'auto-détection de fin de course

a- Mise en marche et arrêt de l'exploitation

La mise en marche de scan débute si les conditions suivantes sont vérifiées :

- la valeur binaire codée sur 2 bits reçue par le module CoreUART correspond à 0x32.
- le moteur est en position A ce qui correspond à la valeur du « comparateur_0 » inférieur à 0x1.
- le PLL génère une fréquence de 1 MHz.

Un compteur sur 16 bits sera piloté par une horloge de fréquence 1 MHz, par suite le système démarre avec cette fréquence.

b- Multiplexage de la vitesse de rotation du moteur

Ce multiplexeur est attaqué soit par le 13ème ou 16ème bit du compteur 16 bits précédemment, synchronisé à une fréquence de 1 MHz, donc une fréquence répondant à la formule suivante est obtenue.

$$f = \frac{F}{2^n} \quad (4.2)$$

Où :

- f : fréquence enfant en Hz
- F : fréquence mère en Hz

n : $i^{\text{ème}}$ bit du comparateur

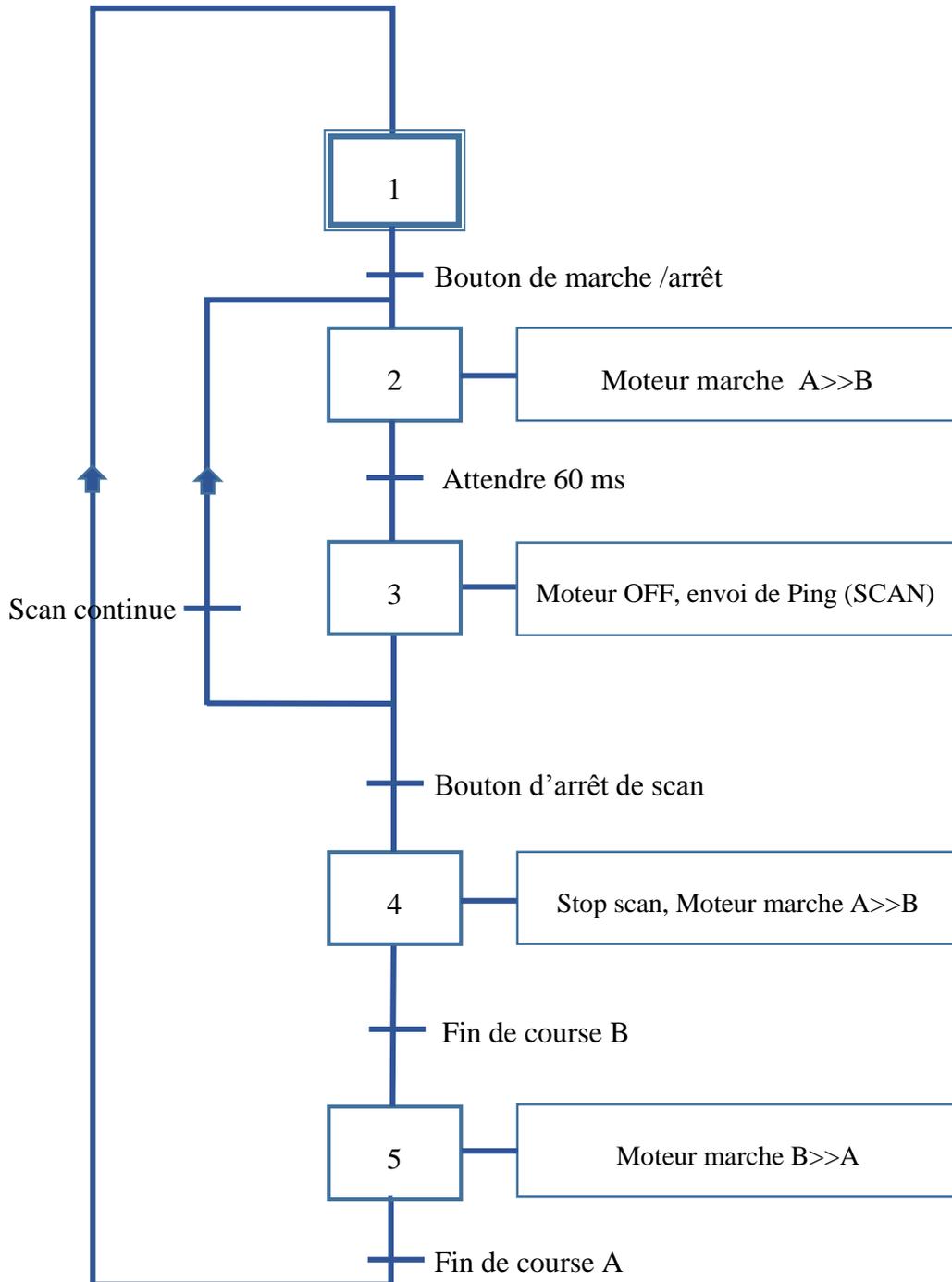


Figure 4.11 - Séquence de commande du moteur en GRAFCET

c- Sens de rotation

Le choix du sens de rotation dépend de l'état des trois multiplexeurs suivant:

- Multiplexeur_inverseur_0, piloté par un compteur sur 3 bits pour réaliser la séquence 1001-1000-1100-0100-0110-0010-0011-0001 qui est le sens positif du moteur,
- Multiplexeur_inverseur_1 réalise le sens inverse : 0001-0011-0010-0110-0100-1000-1001,
- Multiplexeur_direction_0 détecte si le moteur est en position A ou B, selon le cas de la sortie.

d- Détection de fin de course

A la fin du trajet, le module « comparateur_counter_0 » envoie un bit d'arrêt vers le module « mise en marche/arrêt » de l'exploitation.

4.3- SCHEMA RECAPITULATIF DE LA CONCEPTION DE CE PROJET SOUS LIBERO SOC

L'implémentation de système de fonctionnement de projet SoftEye_2 peut se résumer par la Fig 4.12 suivant :

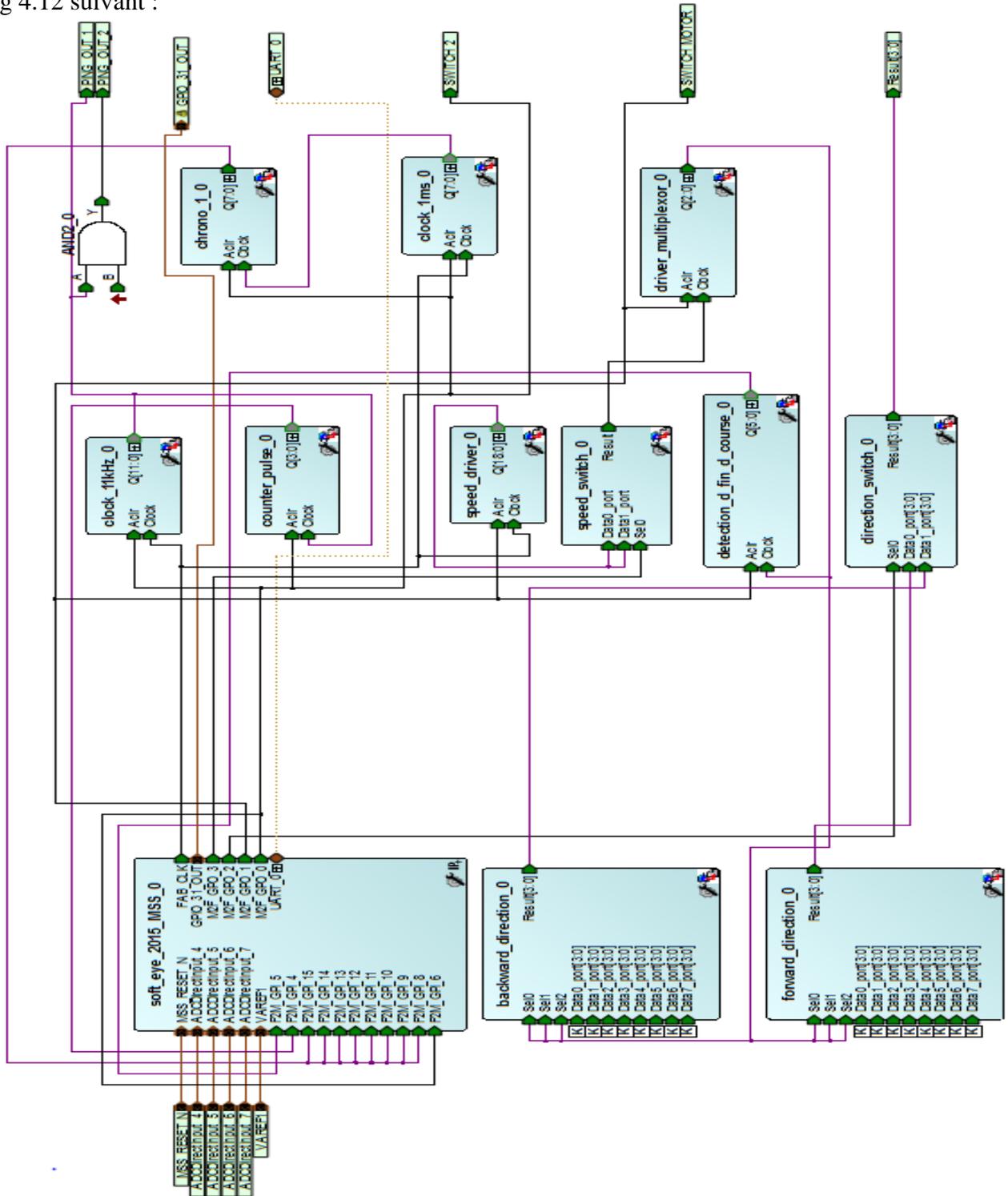


Figure 4.12 - Schéma récapitulatif : génération du signal 12 kHz avec les commandes du moteur

4.4- RESULTATS ET COURBES REPRESENTATIVES

Pour des choix judicieux, la TFR calculera 32 points dont 28 sont des « hydrophones virtuels » et 4 les hydrophones qu'on utilise. Le tableau II ci-dessous définit la direction des faisceaux pour ces 32 échantillons, avec la condition $\lambda = 2 * d$

$$\theta_k = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{d} * \frac{k}{N}\right) \quad (3.7)$$

Tableau II : Direction des faisceaux portés par l'angle θ_k , $N = 32$

k	θ_k
0	0
1	3,58
2	7,18
3	10,8
4	14,48
5	18,2
6	22
7	25,94
8	30
9	34,23
10	38,68
11	43,43
12	48,59
13	54,34
14	61
15	69,63
16	90

Ces valeurs de θ_k sont utilisés pour le calcul des profondeurs afin d'établir la cartographie du milieu à étudier.

Pour la représentation graphique, on utilise la programmation en langage python.

Python est un langage de programmation objet, multi-paradigme et multiplateformes. Il favorise la programmation impérative structurée, fonctionnelle et orientée objet.

Pour tracer des courbes, on utilisera Python comme langage de programmation et les bibliothèques NumPy et matplotlib pour la visualisation.

NumPy est une extension du langage de programmation Python, destinée à manipuler des matrices ou tableaux multidimensionnels ainsi que des fonctions mathématiques opérant sur ces tableaux.

Matplotlib est un module qui permet de réaliser des graphes 2D (et quelques graphes 3D de base).

Matplotlib et pyplot sont les outils pour les tracés.

Les commandes primordiales sont :

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

Voici la courbe de niveau du milieu qu'on a fait l'étude :

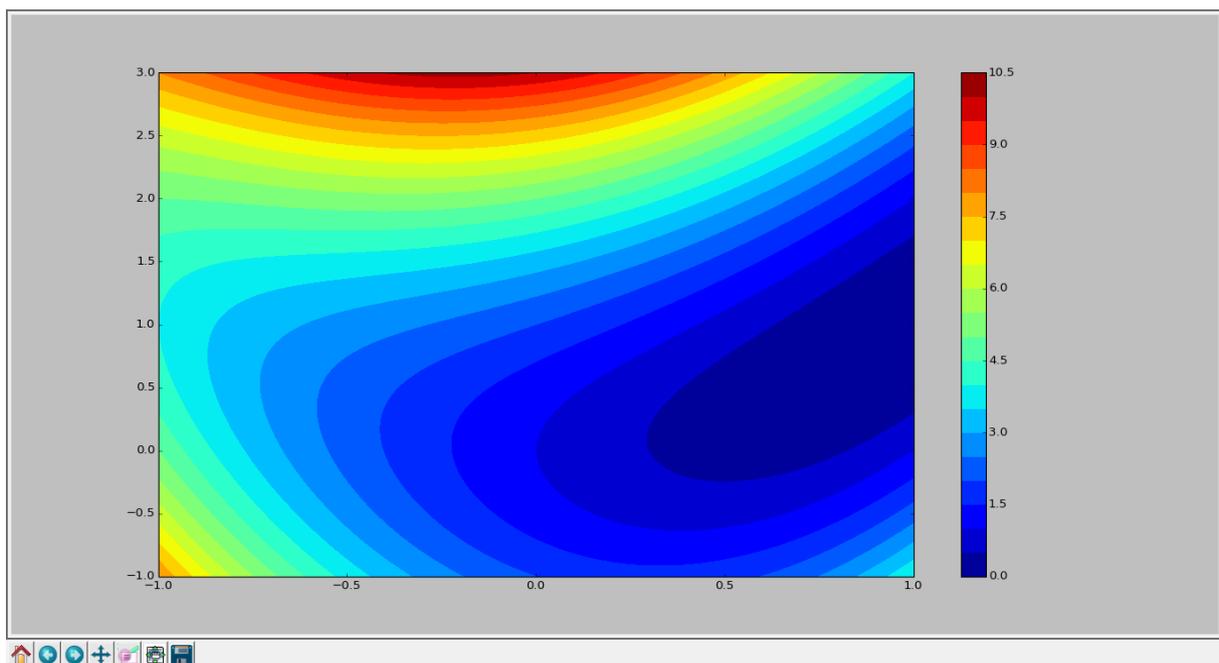


Figure 4.13- Courbe de niveau représentant les profondeurs du milieu étudié réalisé par matplotlib de Python

4.5- CONCLUSION

La réalisation expérimentale du projet « SoftEye_2 » a été représenté dans ce chapitre. L'architecture complète du sondeur multifaisceaux du point de vue électronique a été modélisée. Le travail est focalisé sur l'étude des composants utilisés : l'émetteur et l'hydrophone, le moteur pas à pas pour le système de propulsion et le circuit FPGA ; leurs configurations ; ainsi que le fonctionnement générale du projet.

CONCLUSION GENERALE

Les sondeurs multifaisceaux permettent la création ou la mise à jour des cartographies bathymétriques des fonds marins, avec une très grande précision sur une large couverture. C'est pourquoi dans le domaine de la topographie sous-marine, ils sont devenus des outils adéquats pour l'extraction des mesures de profondeurs et peuvent aller jusqu'à la représentation des reliefs grâce à ces méthodes assez perfectionnées et améliorées. Depuis quelque temps, les recherches et les études dans le domaine des fonds marins ne cessent de s'accroître, et sont presque basés sur ces sondeurs, même si cela représente un coût assez effrayant. De ce fait, nous avons élaboré un système capable de mesurer les surfaces immergés dans l'eau « SoftEye_2 », après avoir fait des études sur le principe de fonctionnement d'un sondeur multifaisceaux.

La technologie multifaisceaux implique un certain nombre de disciplines, notamment de l'acoustique sous-marine et le traitement numérique du signal puisque son principe est basé sur l'émission d'une onde sonore dans l'eau, ensuite attendre l'arrivée des échos, qui est capté par des hydrophones. Grâce à la présence d'un circuit programmable FPGA, offrant une grande flexibilité et sa capacité à faire des calculs plus rapide, il embarquera tous les traitements des signaux issus du sondeur, de l'analogique à la numérique, ensuite fait le calcul des mesures de la profondeur à partir des données reçus.

Les traitements de données des sondeurs multifaisceaux peuvent aller plus loin jusqu'à l'établissement des MNT (Modèle Numérique de Terrain). Faces aux avancées des techniques informatiques, des logiciels comme MapInfo, ou le logiciel de cartographie sous-marine CARAIBES (CARtographie Appliquée à l'Imagerie et la BathymétriE des Sonars et sondeurs multifaisceaux) ou d'autre encore, permettent de traiter des volumes croissants de données et de les regrouper dans des bases de données. Ces données peuvent interagir avec notre projet « SoftEye_2 ». A part la cartographie sous-marine, « SoftEye_2 » peuvent être utilisé dans beaucoup d'autres domaines comme la détection des réserves des pétroles, ou la connaissance des présences des bandes de poissons sur l'océan, ou bien d'autre encore, avec des nouveaux études et traitements de données.

ANNEXE 1 :

MOTEUR PAS A PAS STP-42CI48SE

La Figure A.1 ci-dessous représente le schéma de l'enroulement interne du moteur STP-42CI48SE, et la Fig A.2 la position des pins de ce moteur.

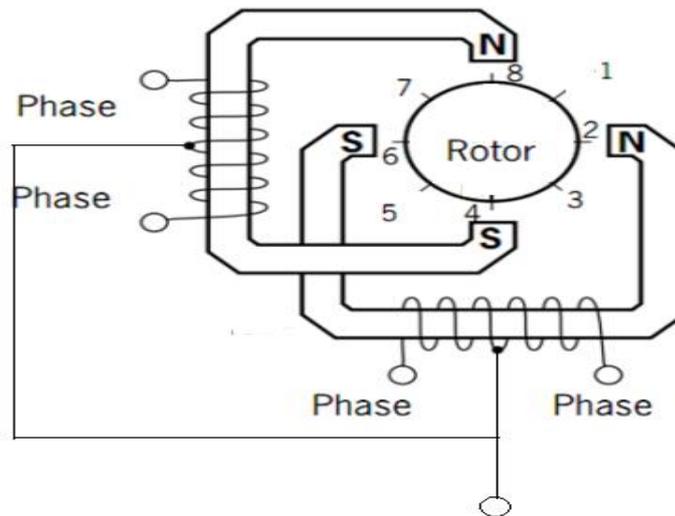


Figure A.1 - Enroulement interne du moteur

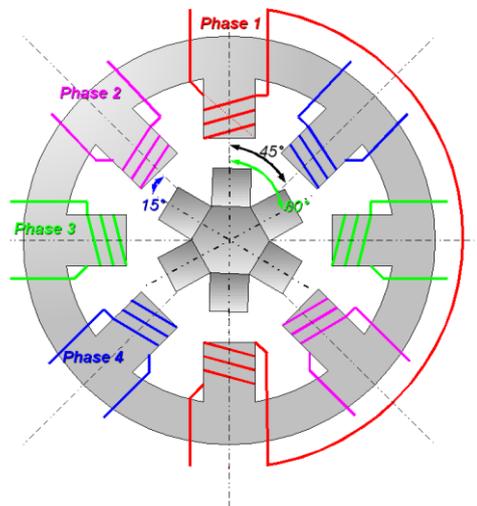


Figure A.2 - Position des pins de moteur pas à pas STP-42CI48SE

ANNEXE 2 :

LES PROPRIETES DES TRANSDUCTEURS UTILISEES

BUZZER PIEZOELECTRIQUE

Un buzzer est un élément électro mécanique ou électronique qui produit un son quand on lui applique une tension. Un buzzer piézoélectrique est typiquement composé d'un diaphragme piézoélectrique, d'une cavité avec un orifice et de connexions pour les bornes électriques. La piézoélectricité est la propriété possédée par certains corps qui se polarisent électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique. Inversement, ces corps peuvent se déformer sous l'action d'un champ électrique. [20]

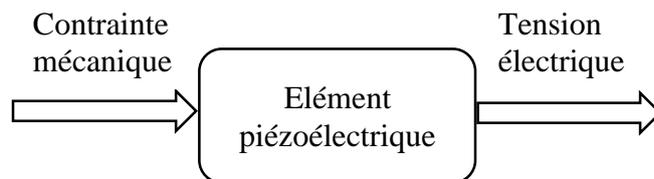


Figure A.3 - Effet piézoélectrique directe

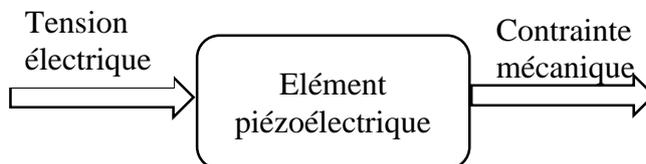


Figure A.4 - Effet piézoélectrique inverse

MICROPHONE A ELECRET

Un microphone à électret est un microphone doté d'un composant appelé Electret, qui peut être assimilé à un condensateur. Ce dernier possède la particularité d'être polarisé de façon permanente au moment de sa fabrication. Permanente en théorie, car en pratique, la polarisation diminue au fil du temps, ce qui provoque une baisse lente mais progressive de la sensibilité du micro. L'impédance de sortie du composant électret interne est très élevée, et on ne peut pas y connecter directement une charge fortement capacitive ou d'impédance trop faible. A cause de cela, il est impossible de raccorder directement la cellule à l'entrée d'un

préampli "classique", surtout si le câble de liaison est de grande longueur. Pour cette raison, la capsule à électret comporte dans son boîtier même, un petit étage électronique chargé d'abaisser cette haute impédance de sortie en une impédance de sortie plus faible et donc plus facilement exploitable.

Ces microphones ont permis la miniaturisation ainsi que l'obtention de microphones de très grandes qualités tout en étant transportable. Seule une alimentation d'une pile suffit. De plus, la miniaturisation des circuits électroniques a permis d'insérer la pile et un circuit amplificateur dans le boîtier conventionnel d'un microphone. Ils sont parmi les plus répandus actuellement. [21]

Les principaux avantages des microphones à électret sont :

- Leur grande capacité par unité de surface,
- Leur aptitude à la miniaturisation,
- L'absence de polarisation continue,
- La disponibilité de capter le son dans toute les directivités,
- La suppression des risques de claquage même en atmosphère humide,
- Peu sensible aux bruits de contact.

ANNEXE 3 :

LE CIRCUIT IMPRIME DE LA CARTE D'ACQUISITION

Un circuit imprimé ou PCB (Printed Circuit Board) est un support, en général une plaque, permettant de maintenir et de relier électriquement un ensemble de composants électroniques entre eux, dans le but de réaliser un circuit électronique complexe. On le désigne aussi par le terme de carte électronique.

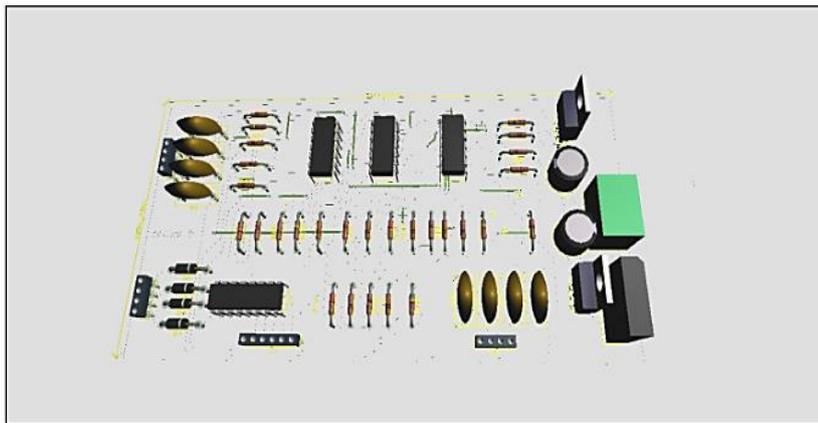


Figure A.5 - Layout de la carte d'acquisition avec PROTEUS

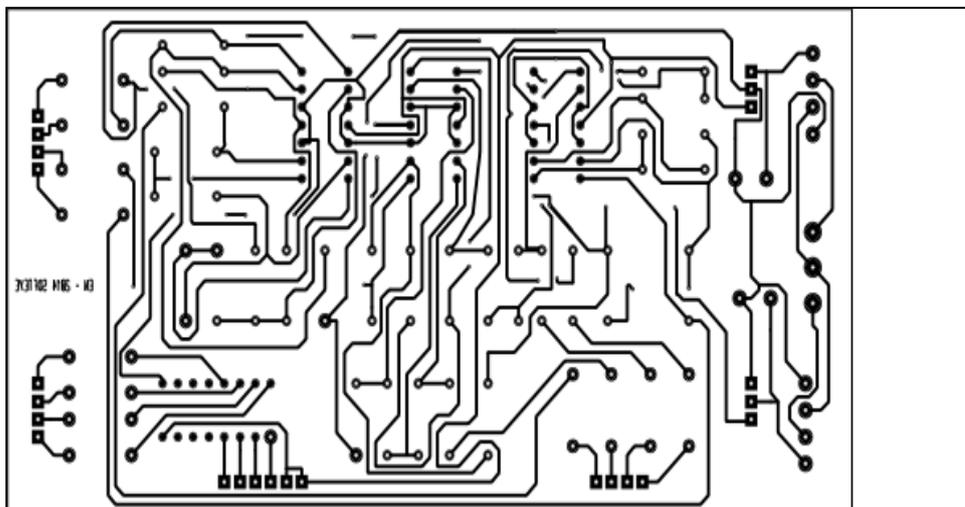


Figure A.6 - Routage de la carte d'acquisition sous PROTEUS

ANNEXE 4 :

CARTE SMARTFUSION EVALUATION KIT A2F-EVAL-KIT-2 DE ACTEL

Horloge système

La carte est embarquée avec deux sources d'horloge à savoir :

- 50 MHz de fréquence valable sur le pin H19 du SmartFusion A2F200M3F-FGG484. Il est possible d'associer à cet horloge un PLL (Phase Locked Loop) ou Device Clock Manager, pour obtenir une grande variété de fréquences et plus de précision.
- 32.768 KHz de fréquence, fournie par un système oscillateur de Pierce. [18]

Le kit d'évaluation SmartFusion comprend :

- Circuit FPGA A2F200M3F-FGG484
- SPI mémoire flash connecté à SPI_0 sur le dispositif
- Connexion USB pour la programmation et de débogage à partir des outils de conception de Microsemi
- Connexion USB vers UART à UART_0 pour des exemples HyperTerminal
- 10/100 Ethernet avec sur puce MAC et PHY externe
- Tête RVI pour la programmation d'applications et de débogage soit Keil ou IAR Systems
- Tête à signal mixte pour le soutien de la carte fille [18]

Entrées et sorties de l'utilisateur :

- Écran OLED 96*16 pixels avec interface I2C connecté à I2C_0 sur le dispositif
- Sortie de premier ordre $\Sigma\Delta$ DAC (delta-sigma) avec une résolution 12bits-500 Ksps
- Potentiomètre
- 8 LEDs connectés à la toile de FPGA pour les FPGA de démonstration
- Jumpers pour l'accès individuel à 4 sur 8 LEDs
- 2 entrées utilisateurs commutateurs connectés à travers le tissu FPGA
- Les deux voyants et interrupteurs peuvent être utilisés avec GPIO en connectant à travers le tissu

- Sélecteur de choisir entre GNU SoftConsole ou RVI-tête pour le débogage
- Sélecteur pour basculer entre la programmation du dispositif (tissu) et le mode de débogage
- Cristal à bord 20 MHz pour l'horloge du système
- À bord 32,768 KHz pour RTC
- 5 utilisateurs I / O pour le débogage
- Accès à-tête pour périphérique utilisé I2C_1
- Accès à-tête pour périphérique utilisé SPI_1
- Accès à-tête pour périphérique utilisé UART_1
- Accès à tête VAREFOUT
- Option pour utiliser un régulateur interne de 1.5 V

Caractéristiques du circuit FPGA SmartFusion A2F200M3F-FGG484 embarqué dans la carte SmartFusion Evaluation Kit

Ils sont donnés par le tableau ci-après :

Tableau III : Caractéristiques du FPGA embarqué sur la carte [18]

Portes logique	1 500 000
Bascule D	1024
PLL clock	2
Blocs de mémoire Flash 2 Mbits	4
Mémoire Flash totale	8 Mbits
Flash ROM	1 kbit
Bloc RAM	60
Entrée / Sortie analogique	40
Entrée/ Sortie numérique	252

ANNEXE 5 : CODE SOURCE DE TFR

Définition arithmétique complexe : «arithmetic_cplx.h »

```
#ifndef H_ARITHMETIC_CPLX
#define H_ARITHMETIC_CPLX

#include <math.h>

// complex variable struct type
typedef struct complex_t
{
    double re;
    double im;
} complex;

// declaration des eventuelles fonctions
complex complex_from_polar(double r, double theta_radians);
double complex_magnitude(complex c);
complex complex_add(complex left, complex right);
complex complex_sub(complex left, complex right);
complex complex_mult(complex left, complex right);

#endif //H_ARITHMETIC_CPLX
```

Fichier "fft.h": Twiddle factor, butterfly equation

```
#include "complex_simple.h"
#include <stdlib.h>
#define PI 3.1415926535897932
complex* FFT_simple(complex* x, int N /* must be a power of 2 */);
complex* FFT_simple(complex* x, int N )
{
    complex* X = (complex*) malloc(sizeof(struct complex_t) * N);
    complex * d, * e, * D, * E;
    int k;
    if (N == 1)
    {
        X[0] = x[0];
        return X;
    }
    e = (complex*) malloc(sizeof(struct complex_t) * N/2);
    d = (complex*) malloc(sizeof(struct complex_t) * N/2);
    for(k = 0; k < N/2; k++)
```

```

{
    e[k] = x[2*k];
    d[k] = x[2*k + 1];
}
E = FFT_simple(e, N/2);
D = FFT_simple(d, N/2);
                                // twiddle factor
for(k = 0; k < N/2; k++)
{
    /* Multiply entries of D by the twiddle factors  $e^{-2\pi i/N * k}$  */
    D[k] = complex_mult(complex_from_polar(1, -2.0*PI*k/N), D[k]);
}
for(k = 0; k < N/2; k++)          // FFT- butterfly equation
{
    X[k]    = complex_add(E[k], D[k]);
    X[k + N/2] = complex_sub(E[k], D[k]);
}
free(D);
free(E);
return X;
}

```

ANNEXE 6 :

NOTION SUR LE GRAFCET

Définition

Le GRAFCET est un outil graphique de description des comportements d'un système logique. Il est composé d'étapes, de transitions et de liaisons selon la Fig A.8 d'un exemple suivante. [22]

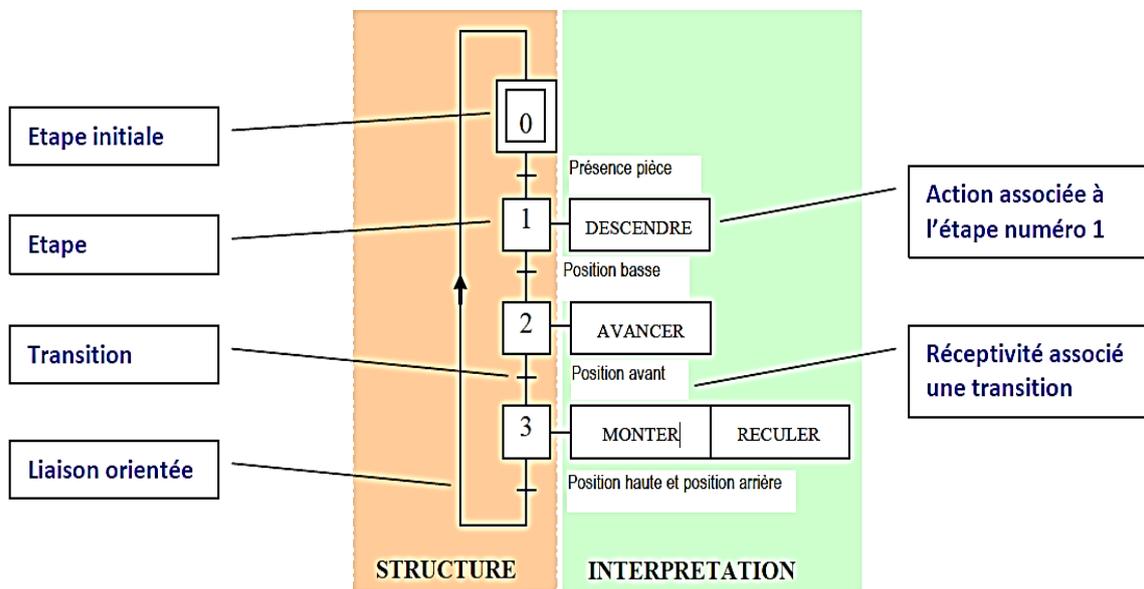


Figure A.7 - Exemple d'un GRAFCET avec explication

Règle d'évolution

Règle 1 - Situation initiale

L'étape initiale caractérise le comportement de la partie commande d'un système en début de cycle. Elle correspond généralement à une position d'attente. L'étape initiale est activée sans condition en début de cycle. Il peut y avoir plusieurs étapes initiales dans un même GRAFCET.

Règle 2 - Franchissement d'une transition

Une transition est validée si toutes les étapes précédentes sont actives immédiatement. L'évolution du GRAFCET correspond au franchissement d'une transition qui se produit sous deux conditions :

- si cette transition est validée
- si la réceptivité associée à cette transition est vraie

Si ces deux conditions sont réunies, la transition devient franchissable et est obligatoirement franchie.

Règle 3 - Evolution des étapes actives

Le franchissement d'une transition entraîne simultanément l'activation de toutes les étapes immédiatement suivantes et la désactivation de celles immédiatement précédentes.

Règle 4 - Evolution simultanée

Plusieurs transitions simultanément franchissables sont simultanément franchies.

Règle 5 - Activations et désactivations simultanées

Si, au cours du fonctionnement, une même étape doit être désactivée et activée simultanément, elle reste active.

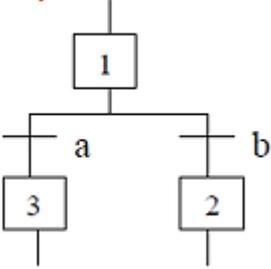
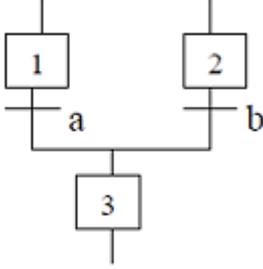
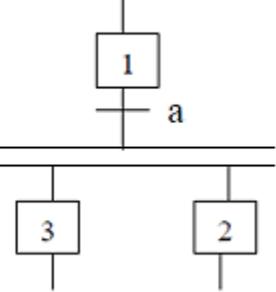
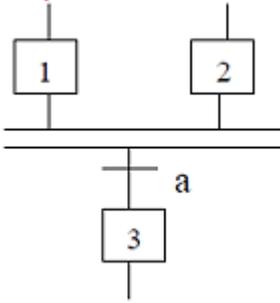
Structure de base

Séquence unique

C'est une suite d'étapes pouvant être activées les unes après les autres.

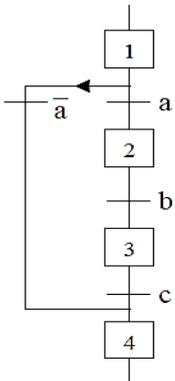
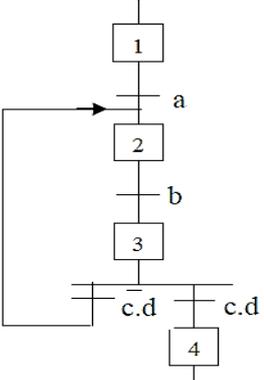
Séquences simultanées et alternatives

Tableau IV : Divergence ou Convergence de GRAFCET [22]

<p>Divergence en OU (structure alternative)</p>  <p>Si 1 active et si a seul, alors désactivation de 1 et activation de 3, 2 inchangé. Si a et b puis 1 active alors désactivation 1, activation 2 et 3 quel que soit leur état précédent (Règle)</p>	<p>Convergence en OU (structure alternative)</p>  <p>Si 1 active et a sans b, alors activation de 3 et désactivation de 1,2 reste inchangé. Si 1 et 2 et a et b, alors 3 seule est active.</p>
<p>Divergence en ET (structure simultanée)</p>  <p>Si 1 active et si a, alors désactivation de 1 et activation de 2 ET 3</p>	<p>Convergence en ET (structure simultanée)</p>  <p>Si 1 active seule et a, alors aucun changement. Si 1 ET 2 et a, alors activation de 3 et désactivation de 1 et 2.</p>

Saut d'étapes

Tableau V - Représentation de saut d'étapes [22]

<p>Boucle Si Alors</p> 	<p>Boucle Répéter Tant que</p> 
---	--

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ROUSSEL Nicolas ; Rapport de stage ST2-TOPOGRAPHIE à CENTRO OCEANOGRAFICIO DE MALAGA ; Juillet 2011.
- [2] Ondes et Acoustique dans les Fluides ; Master de Physique Appliquée et Mécanique ; UNIVERSITE PARIS - SUD 11 ; P-AM-307B : Version du 27 mars 2015.
- [3] Yoann LADROIT ; Amélioration des méthodes de détection et de qualification des sondes pour les sondeurs multifaisceaux bathymétriques; Thèse de doctorat de Télécom Bretagne ; Traitement du Signal et Télécommunications ; Université de Rennes 1 ; soutenue le 28 Novembre 2012.
- [4] Aurélie Boudier, Emmanuelle Guibert ; Cours d'Acoustique Techniciens Supérieurs Son 1^{ère} année ; 2006-2007.
- [5] Sandie LE CONTE ; Comparaison de mesures de réflectivité à l'interface eau-sédiments à partir de données de sondeurs multifaisceaux, de sédiments et de sismique Haute Résolution 3D; Géosciences Rennes Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer Ecole Doctorale Sciences de la Matière ; Structures et Propriétés des Matériaux ; Université de Rennes 1 ; soutenue le 17 Décembre 2004.
- [6] H. Bisquay - SHOM - 1999 ; Sondeurs multifaisceaux ; SHOM ; 1999
- [7] J. DEVERCHERE ; Partie 2 : Reconnaissance des fonds sous-marins (sondeurs mono et multifaisceaux, sonar), Engins téléopérés et autonomes (ROV et AUV) ; 2012
- [8] A. Ehrhold ; L'application des Sondeurs Multifaisceaux (SMF) très petits fonds pour la cartographie des habitats marins ; Décembre 2003
- [9] Xavier Lurton ; Acoustique sous-marine Présentation et applications ; 2001
- [10] Fabrice Sincère ; Filtrage numérique d'évolution lente avec un microcontrôleur ; Cours Version 1.2.2
- [11] E341 ; Théorie du Signal ; Cours en 3^{ème} Année Electronique ; Département Electronique ; ESPA ; Année Universitaire 2011 - 2012
- [12] E531 ; Traitement Numérique du Signal ; Cours en 5^{ème} Année Electronique ; ESPA ; Année Universitaire 2013-2014

- [13] Multibeam Sonar Theory of Operation; L-3 Communications SeaBeam Instruments; 141 Washington Street East Walpole, MA 02032-1155; 2000
- [14] Johanna MARIANI ; Programmation et Utilisation du FPGA pour la validation et la vérification de circuits électroniques ; Mémoire d'Ingénieur ; Electronique ; Conservatoire National des Arts et des Métiers ; Soutenu le 8 Février 2011
- [15] Les FPGA Technologie, architecture et utilisation ; écrit par Lilian Bossuet en 2010 ; Les circuits matériels reconfigurables-FPGA .pdf
- [16] E435 ; Mesures des Grandeurs Physiques et Capteurs ; Cours en 4^{ème} Année Electronique ; Département Electronique ; ESPA ; Année Universitaire 2012-2013
- [17] MIARISOA Sandy Andrianjafy (*) et RAMILIARIVONY Johny Andimaharo (**); Conception et réalisation d'un Sondeur Multifaisceaux « Soft-Eye » par application d'un circuit FPGA ; Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur ; Département Electronique ; Option Informatique Appliquée* et Electronique Automatique ** ; ESPA ; Soutenu le 30 Juillet 2014.
- [18] SmartFusion Evaluation kit ; <http://www.microsemi.com/products/fpga-soc/design-resources/dev-kits/smartfusion/smartfusion-evaluation-kit> ; visité le 18/06/2015
- [20] ALMEIDA Susana ; Etude l'effet piézoélectrique ; 2013
- [21] Les microphones ; [http://www.epsic.ch/cours/electronique/techn99/buzzer & microphone & hydrophone/ACOUSTIQUE THEORIQUE LES MICROPHONES.html](http://www.epsic.ch/cours/electronique/techn99/buzzer%20&%20microphone%20&%20hydrophone/ACOUSTIQUE%20THEORIQUE%20LES%20MICROPHONES.html) ; visité le 17/06/2015
- [22] E553 EA; Electronique Industrielle; Cours de 5ème-Année ; Département Electronique; ESP Antananarivo; 2012-2013

Titre : TRAITEMENT NUMERIQUE DE SIGNAL DU SONDEUR MULTIFAISCEAUX
« SoftEye_2 » PAR UTILISATION D'UN CIRCUIT FPGA

Auteurs : ANDRIANJAFY Antsa A. V. **Option :** INFORMATIQUE APPLIQUEE

Nombre de page : 94

Nombre de figure : 48

Nombre de tableau : 5

RESUME :

Les sondeurs multifaisceaux ont l'intéressante capacité d'établir une carte bathymétrique, qui est très utile dans de nombreux domaines scientifiques. Son principe de fonctionnement est basé sur la méthode d'émission d'un signal acoustique par un transducteur, le signal réfléchi par le fond est reçu par d'autre type de transducteurs. L'objectif de notre mémoire est fondé sur le traitement de signal issu d'un sondeur multifaisceaux, par utilisation du circuit programmable FPGA (Field Programmable Gate Array) comme support pour l'implémentation du processus de traitement et de contrôle des flux de données, afin d'obtenir des mesures de la profondeur de la surface immergée.

Le projet sondeur multifaisceaux bathymétrique « SoftEye_2 », réalisé à l'échelle laboratoire, tout en gardant le même principe et structure à l'échelle industrielle, a été élaboré. Il est indispensable de préciser qu'il y avait déjà un « SoftEye_1 », par contre, nous apportons des améliorations sur les méthodes de détection, les qualités de sondes utilisées, et le traitement des données reçus. Le processus de fonctionnement de « SoftEye_2 » se résume par : la génération du signal à émettre, le traitement du signal reçu pour parvenir à la mesure bathymétrique de la zone étudiée. Les résultats seront acquis en mode console.

MOTS CLES : Sondeur multifaisceaux, Traitement Numérique du Signal, FPGA, onde

Encadreur : Madame RAMANANTSIHOARANA Harisoa Nathalie

Contact :

Téléphone : 0330882894

Mail : antsavatosoa@gmail.com

0347323873