



HAL
open science

Développement et calibration d'une station sismologique trois composantes

Jose Xavier Revilla Rondon

► **To cite this version:**

Jose Xavier Revilla Rondon. Développement et calibration d'une station sismologique trois composantes. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1996. Français. NNT: . tel-00721902

HAL Id: tel-00721902

<https://theses.hal.science/tel-00721902>

Submitted on 31 Jul 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

OBSERVATOIRE DE GRENOBLE
et
LABORATOIRE DE GÉOPHYSIQUE INTERNE ET TECTONOPHYSIQUE

THÈSE

PRESENTÉE PAR

José Javier REVILLA RONDÓN

POUR OBTENIR LE TITRE DE
DOCTEUR

DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1
(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Géophysique - Géochimie - Géomécanique

**DÉVELOPPEMENT ET CALIBRATION D'UNE STATION
SISMOLOGIQUE TROIS COMPOSANTES**

Composition du jury :

M. M. CAMPILLO	Président
M. J. DOREL	Rapporteur
M. G. WITTLINGER	Rapporteur
M. J. FRÉCHET	Directeur de thèse
M. J. SARRAULT	Examineur

Date de soutenance : le 10 juin 1996

OBSERVATOIRE DE GRENOBLE
et
LABORATOIRE DE GÉOPHYSIQUE INTERNE ET TECTONOPHYSIQUE

THÈSE

PRESENTÉE PAR

José Javier REVILLA RONDÓN

POUR OBTENIR LE TITRE DE

DOCTEUR

DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Géophysique - Géochimie - Géomécanique

**DÉVELOPPEMENT ET CALIBRATION D'UNE STATION
SISMOLOGIQUE TROIS COMPOSANTES**

Composition du jury :

M. M. CAMPILLO	Président
M. J. DOREL	Rapporteur
M. G. WITTLINGER	Rapporteur
M. J. FRÉCHET	Directeur de thèse
M. J. SARRAULT	Examineur

Date de soutenance : le 10 juin 1996

A Fabienne, magicienne.

A Rosa, en fleur.

A Guillaume dans la montagne.

(...)

Sangue di primavera,
tutta la terra trema
di un antico tremore.

(...)

Cesare Pavese

(...)

The world is not at ease
But quakes under the march of our boots

(...)

Mafika Mbuli

Remerciements

Je voudrais remercier d'abord mon directeur de thèse, Julien Fréchet. Pour toutes les connaissances transmises, mais aussi pour les évolutions successives qu'il a su déclencher. Je voudrais remercier toute l'équipe du réseau Sismalp : François Thouvenot, Liliane Jenatton et Robert Guiguet.

Je remercie les membres de mon jury : Michel Campillo, Jacques Dorel, Jacques Sarrault et Gérard Wittlinger. Ils m'ont fait l'honneur de réviser mon travail. Ils ont corrigé mes erreurs et ils m'ont donné des conseils précieux.

Ce travail a été fait en collaboration avec la société Leas. Pascal Sulpice a été mon binôme. Jacques Sarrault et Jean Angelidis m'y ont accueilli. Jean-Marc Neuville m'a enrichi avec sa conversation, toujours intéressante.

Plusieurs personnes m'ont stimulé et appuyé pendant la réalisation de mon travail. Georges Poupinet m'a reçu dans son laboratoire. Manuel Chang Ching, mon professeur à l'Institut Géophysique du Pérou, m'a donné l'opportunité de venir en France. Il m'a toujours honoré avec sa confiance et son intérêt. Nicolas Shapiro a orienté mon bateau dans des heures de tempête. Michel Bouchon m'a toujours encouragé et m'a aidé à comprendre que la vie n'est pas une tragédie grecque. Jean-François Fels m'a fourni des raccourcis. Catherine Pequegnat a résolu, patiente, mes problèmes en informatique. Francis Bondoux a participé aux derniers essais de la station.

Mais, sans doute, je n'aurais pu rien faire sans le support de ma famille à Grenoble. Ma famille est assez grande et je ne peux pas écrire ici tous les noms de mes soeurs et de mes frères. Je les écris plutôt sur les plis de certains moments d'une insupportable beauté. Du feu de bois qui nous parle en langues dans l'obscurité d'une colline verte. Une barque construite pour aller derrière les mers, l'éveil sous la pluie dorée. Des notes qui dansent sur les cordes, sans aucune peur de l'abîme. Des conversations interminables sur les filles du soleil, rayonnantes comme leur père, mais partageant d'autres caractéristiques aussi. Des conversations sur des pays lointains, devenus les miens. Des conversations sur mon pays lointain. Des conversations sur des troisièmes chemins, au delà des dichotomies. Un certain procès stalinien, qui a montré que l'amour peut prendre plusieurs voies. Certains coups de pied appliqués avec une précision surprenante (qui relève sûrement de l'expérience).

Carolina, ma mère et Freddy, mon père. Carolina, ma soeur et Freddy, mon frère. Au Pérou et aux Etats-Unis, toujours présents.

Je voudrais, enfin, remercier la région Rhône-Alpes et le CNRS.

Abstract

A three-component, 24 bit, continuously recording, low cost and low power seismic field unit has been developed in cooperation with a french company. The instrument is entirely controled by telephone, but it can also be used as an autonomous station.

The field unit architecture includes a PC card. A personal computer is actually the heart of the instrument. Data is stored on a PCMCIA hard disk (340 Mb). Flash card and DAT storing would also be possible. Software written by the user can be installed on the hard disk for field data processing.

Communication is accomplished with 14400 bps modems. The field-unit's wide band and low noise permit the utilisation of many kinds of seismometer.

An analytical expression of the instrumental response of the field-unit has been obtained. The three-component seismometer has been calibrated with a procedure that uses a pseudo-random binary signal. A minimisation procedure is used to adjust the seismometer's parameters to experimental results. This calibration procedure can be executed automatically on a routine basis.

Table des matières

Chapitre 1 - INTRODUCTION	1
Chapitre 2 - LE DÉVELOPPEMENT DE LA BALISE SISMALP 3	9
2.1 La balise Sismalp 3 - Certains aspects du matériel	14
2.2 La balise Sismalp 3 - Certains aspects du logiciel	35
Chapitre 3 - LE PROGRAMME DE COMMUNICATION SIS3	63
3.1 Architecture du programme Sis3	66
3.2 Fonctionnement des programmes Sis3Mod, Sis3Dir et Sis3Bus	75
3.3 L'interface utilisateur graphique	80
3.4 Le programme principal	106
3.5 Les procédures d'interruption	112
3.6 Insertion du programme Sis3 dans le système Sismalp	120
Chapitre 4 - LA CONFIGURATION SISMALP 3 - PC	123
4.1 La carte PC et le disque dur	123
4.2 La carte de communication ComBus	125
4.3 Le protocole de communication ComBus	127
4.4 Le programme Sis3Bus	132

4.5 Fonctionnement du système Sismalp 3 - PC	132
4.6 Applications et perspectives de la configuration Sismalp 3 - PC	137
Chapitre 5 - LA CALIBRATION DES STATIONS SISMALP 3	139
5.1 La calibration des stations sismiques	140
5.2 Signal binaire pseudo-aléatoire	144
5.3 Détermination du spectre discret de la fonction de transfert - Méthode interspectrale	150
5.4 Méthode de minimisation du simplexe	155
5.5 Fonction de transfert analytique	161
5.6 Opération de calibration et présentation des résultats	191
5.7 Conclusions	211
Chapitre 6 - APPLICATIONS ET CONCLUSIONS	215
6.1 Applications	215
6.2 Conclusions	234

BIBLIOGRAPHIE

Table des illustrations

Chapitre 2 - LE DÉVELOPPEMENT DE LA BALISE SISMALP 3

Figure 2.1(a) - Architecture de la station Sismalp 3.	15
Figure 2.1(b) - Architecture de la station Sismalp 3 PC.	16
Figure 2.2 - Schéma de blocs de la carte d'acquisition.	18
Figure 2.3 - Electronique de conditionnement analogique. Canal faible niveau, canal fort niveau.	19
Figure 2.4 - Convertisseur analogique numérique AD7712.	22
Figure 2.5 - Trame minute Télécode.	36
Figure 2.6 - Séisme régional (80 km), télé-séisme et bruit sismique.	45

Chapitre 3 - LE PROGRAMME DE COMMUNICATION SIS3

Figure 3.1 - Configuration Sis3Mod.	77
Figure 3.2 - Configuration Sis3Dir.	79
Figure 3.3 - Configuration Sis3Bus.	81
Figure 3.4 - Interface utilisateur du programme Sis3Dir, après décodage de l'heure universelle.	82
Figure 3.5 - Les différents éléments de l'interface utilisateur.	84
Figure 3.6 - Boîte d'erreur de niveau 2.	85
Figure 3.7 - Boîte d'entrée de données.	86
Figure 3.8 - Fenêtre principal après les commandes LIST et TRAN.	94
Figure 3.9 - Fenêtre de visualisation (commande VISU).	97

Chapitre 4 - LA CONFIGURATION SISMALP 3 - PC

Figure 4.1 - La carte ComBus.	128
-------------------------------	-----

Chapitre 5 - LA CALIBRATION DES STATIONS SISMALP 3

Figure 5.1 - Signaux de calibration, domaine du temps.	147
Figure 5.2 - Signaux de calibration, domaine de la fréquence.	148
Figure 5.3 - Amplification dans l'échelle du temps de la figure 5.1.	149
Figure 5.4 - Méthode de calibration.	151
Figure 5.5 - Méthode du simplexe. Espace de toutes les solutions possibles.	158
Figure 5.6 - Méthode du simplexe. Mécanismes utilisés pour la détermination des nouveaux sommets.	159
Figure 5.7 - Réponse à la vitesse du mouvement du sol. Courbe fournie par Mark Products.	163
Figure 5.8 - Schéma du sismomètre.	165
Figure 5.9 - Réponse à la vitesse du mouvement du sol. Fonction de transfert analytique $H_1(\omega)$. Sismomètre amorti.	169
Figure 5.10 - Réponse à la tension de calibration. Fonction de transfert analytique $Q(\omega)$. Bobine de calibration.	171
Figure 5.11 - Schéma fonctionnel de l'électronique de conditionnement du signal.	173
Figure 5.12 - Fonction de transfert analytique $H_2(\omega)$. Electronique de conditionnement du signal. Gain = K/RC .	177
Figure 5.13 - Fonction de transfert analytique $H_3(\omega)$. Filtre numérique du convertisseur sigma-delta AD7712.	183
Figure 5.14 - Linéarité de la réponse en phase du filtre numérique du convertisseur sigma-delta AD7712.	184
Figure 5.15 - Les trois blocs de la station Sismalp 3.	188
Figure 5.16 - Réponse à la vitesse du mouvement du sol. Fonction de transfert analytique $H(\omega)$. Station Sismalp 3.	189
Figure 5.17 - Réponse à la tension de calibration. Fonction de transfert analytique $Q(\omega)H(\omega)$. Bobine de calibration et station Sismalp 3.	190
Figure 5.18 - Schéma fonctionnel du circuit de calibration.	194
Figure 5.19 - Tension de calibration v_c , sortie expérimentale s_e et sortie théorique s_t . Domaine du temps.	197
Figure 5.20 - Tension de calibration V_c , sortie théorique S , et fonctions de transfert $Q_i H_i$. Domaine de la fréquence.	198
Figure 5.21 - Facteur de correction initial R et final R' (amplitude).	207
Figure 5.22 - Facteur de correction initial R et final R' (phase).	208
Figure 5.23 - Fonction de transfert initial $Q_i H_i$ et final $Q_i' H_i'$ (amplitude).	209
Figure 5.24 - Sortie expérimentale s_e et sortie théorique s_t calculée avec les nouveaux paramètres. Domaine du temps.	210

Chapitre 6 - APPLICATIONS ET CONCLUSIONS

Figure 6.1 - Le réseau Sismalp.	217
Figure 6.2 - Séisme régional du 18 avril 1996. Rapport émis par le réseau Sismalp.	219
Figure 6.3 - Séisme régional du 18 avril 1996. Enregistrements de tout le réseau.	220
Figure 6.4 - Séisme régional du 18 avril 1996. Enregistrements de la station RSL.	221
Figure 6.5 - Télé-séisme du 28 mars 1996. Enregistrements de tout le réseau.	222
Figure 6.6 - Télé-séisme du 28 mars 1996. Enregistrements de la station RSL.	223
Figure 6.7 - Saturation des enregistrements.	224

Chapitre 1 - Introduction

Le mot grec pour instrument est *organon*. L'instrument serait donc une machine qui augmente la capacité de perception ou d'expression de l'homme. Excalibur était un instrument, ainsi que la flûte du flûtiste de Hamelin. Icare est tombé dans la mer parce qu'il a voulu approcher le soleil avec un instrument mal adapté. Les vikings ont couvert la surface de la Terre avec des instruments presque parfaits, des longs bateaux les a-t-on appelés. Pour que l'instrument ne se tourne pas contre son créateur, un équilibre subtil doit être établi. Cet équilibre prend ses racines dans le passé et se projette ensuite vers le futur, car les décisions que l'on prend maintenant auront des conséquences importantes dans l'avenir.

Un instrument scientifique n'est pas un objet isolé. Il inclut tous les modules d'une complexe chaîne d'acquisition : les capteurs, les appareils d'enregistrement, la transmission des données et, finalement, le stockage et les outils de distribution de l'information. Les développements technologiques récents ont permis des évolutions importantes dans toutes ces directions. Le développement de la technologie sigma-delta (convertisseurs analogiques numériques) a permis la construction de stations grande dynamique avec une consommation d'énergie et un coût raisonnables. Les évolutions des réseaux satellites (VSAT et autres) et des réseaux téléphoniques mobiles (GSM) permettent la transmission des données dans des endroits isolés et éloignés des zones urbaines. Le réseau satellite GPS (Global Positioning System) permet la synchronisation à l'heure universelle, ainsi que la localisation précise d'une station dans n'importe quel endroit de la planète. Les moyens de stockage optique offrent une meilleure densité de l'information stockée, ainsi que une grande fiabilité et durée de vie des enregistrements. La croissance du réseau Internet permet, enfin (si la politique d'utilisation

actuelle est maintenue), la distribution presque en temps réel des informations acquises, à l'échelle globale.

Ces nouvelles technologies provoquent un flot d'information non négligeable. D'autre part, une tendance naturelle en géophysique est d'incrémenter le nombre d'instruments pour avoir une couverture plus adéquate du phénomène scientifique. Le scientifique risque alors d'être noyé dans cette avalanche d'information. Dans certains cas, les scientifiques n'ont pas assez de temps pour faire une interprétation de leurs données, se dédiant alors à l'accumulation. Les conséquences de ce phénomène seraient tragiques. On imagine un monde où le scientifique serait au service de l'instrument plutôt que le contraire.

Heureusement, il existe plusieurs alternatives à ce genre de dangers. L'une d'elles est la standardisation, c'est-à-dire la concertation des efforts dans une seule direction. Une autre est l'automatisation de toutes les étapes qui concernent la chaîne d'acquisition de données.

Un autre aspect à prendre en considération est la nature du phénomène géophysique en général et du phénomène sismique en particulier. En effet, nous sommes en face d'un problème qui se déroule à plusieurs échelles dans l'espace et dans le temps. Il est nécessaire d'avoir des instruments capables de couvrir ces deux échelles.

Dans l'échelle du temps, l'étude des micro-séismes ou des doublets sismiques nous oblige à connaître l'arrivée de l'onde sismique avec une précision de l'ordre de la milliseconde. D'autre part, l'étude du cycle sismique et des phénomènes de récurrence nous ramène vers des échelles équivalentes à celle de l'histoire de l'humanité. Malheureusement, les premiers enregistrements sismiques dont on dispose datent de la fin du siècle dernier. Or, les sources historiques des anciennes civilisations méditerranéennes et du Moyen-Orient nous donnent des repères intéressants par rapport à des grands phénomènes destructeurs qui ont, parfois, marqué la fin d'une période ou le début d'une autre (on ne saura pourtant jamais si Alexandre le Grand ou un grand séisme fut le responsable de la destruction du palais de Darius, à Persepolis).

On dispose des enregistrements analogiques sur papier depuis la fin du siècle dernier. A partir de années 40, les enregistrements analogiques sur bande magnétique sont devenus courants. Malheureusement, la bande magnétique a une période de vie assez limitée. Des enregistrements des années 60 sont déjà inutilisables. Dans ce contexte, les enregistrements sur des supports optiques semblent être une alternative intéressante pour la transmission de l'information aux générations futures.

Dans l'échelle de l'espace on s'intéresse à un phénomène qui évolue de la dimension atomique jusqu'à l'échelle de la terre.

La couverture idéale de ce genre de phénomènes serait donc faite par trois types de réseaux qui seraient en interaction permanente : les réseaux globaux, les réseaux régionaux et les réseaux locaux. Pour éviter les dangers énoncés ci-dessus, cette interaction doit obéir à des politiques globales. L'aspect le plus important est la standardisation du matériel ainsi que l'utilisation d'un même format qui puisse servir de référence. Un effort intéressant a été fait dans cette direction par la FDSN (Federation of Digital Seismographic Networks). Cette organisation a adopté en 1987 le format SEED (Standard for Exchange of Earthquake Data) (Reference Manual. SEED Format Version 2.3, february 1983).

Les réseaux globaux sont constitués de plusieurs types de stations. Les réseaux les plus importants actuellement sont :

- le WWSSN (World Wide Standard Seismographic Network),
- le GDSN (Global Digital Seismograph Network),
- le IDA (International Deployment of Accelerometers),
- le réseau Geoscope (géré par l'Institut de Physique du Globe de Paris et par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg).

Ces réseaux couvrent de façon assez dense l'hémisphère nord de la planète. L'hémisphère sud est beaucoup moins instrumenté. La couverture dans les océans est limitée à quelques stations installées dans des îles plus ou moins isolées.

Des efforts sont faits actuellement pour développer des stations multi-mesures qui agiraient dans des milieux hostiles. Les GOBO (Geophysical Ocean Bottom Observatories) seraient des véritables observatoires géophysiques installés sur le fond des océans. En mai 1992 une expérience pilote a été conduite par le programme français OFM (Observatoire de Fond de Mer). Deux jeux de capteurs large bande CMG3 ont été déposés, ont fonctionné pendant une semaine et ont été ensuite récupérés.

L'expérience acquise dans ce genre de projets a permis le développement de la sismologie planétaire. Des sismomètres large bande avec une grande résistance aux accélérations seront incorporés dans les deux vaisseaux de la mission russe MARS96. Ces vaisseaux seront lancés à la fin de l'année 1996. L'atterrissage sur la surface de Mars est prévu pour septembre 1997.

Mais remettons les pieds sur terre. En France, les réseaux régionaux et locaux sont gérés par plusieurs institutions. La plus importante est le Réseau National de Surveillance Sismique (Rénass). Il s'agit d'une fédération de réseaux régionaux. Le site central se trouve à l'Institut de Géophysique du Globe de Strasbourg (IPGS). Les réseaux regroupés par le Rénass sont présentés ci-dessous :

- Le réseau d'Auvergne (J. Dorel). Il est constitué de 4 stations télémétrées et 2 stations téléphoniques type Sismalp 1. Le 05/12/94 une station du type Sismalp 1 a été installée à Oléron.

- Les réseaux du Fossé Rhénan, de l'Arrière Pays Niçois, de Provence et les stations isolées (P. Hoang Trong). Le réseau du Fossé Rhénan est constitué de 10 stations télémétrées. Il est complété par des stations allemandes et une station suisse. Le réseau de l'Arrière Pays Niçois est constitué de 8 stations télémétrées. Le réseau de Provence est constitué de 8 stations télémétrées.

- Le réseau des Pyrénées Orientales (L. Martel). Ce réseaux est constitué de 10 stations Météosat et de 2 stations téléphoniques.

- Le réseau national large bande (A. Deschamps, M. Granet). Cette opération a démarrée en 1992. Neuf stations type Agecodagis ont été déjà installées.

Parmi les institutions indépendantes du Rénass on peut citer les réseaux ci-dessous :

- Le réseau Sismalp de l'Observatoire de Grenoble (J. Fréchet et F. Thouvenot) couvre les Alpes Occidentales, la Provence et la Corse avec 41 stations.

- Le Laboratoire de Détection et de Géophysique du Commissariat à l'Energie Atomique (LDG-CEA) dispose de stations courte période et large bande.

- L'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) a instrumenté plusieurs centrales nucléaires.

- L'EDF (Electricité de France), enfin, possède quelques stations aux alentours de certains barrages. L'accès à l'information est, malheureusement assez restreint.

Le réseau Sismalp rentre dans la catégorie de réseau régional. Avec 41 stations, reliées par ligne téléphonique au site central, à Grenoble, il couvre la chaîne alpine occidentale depuis le lac Léman jusqu'à la Corse. Il s'agit d'un réseau automatisé, permanent, dense (30 km en moyenne entre les stations) et d'un faible coût d'installation et d'opération. La basse consommation des stations et leur fiabilité réduisent les opérations sur le terrain. Le réseau Sismalp utilise des stations une composante avec une dynamique de 10 bits. Les capteurs utilisés sont des sismomètres Mark Products L4C, avec une fréquence naturelle égale à 1 Hz.

Le projet Sismalp 3 avait comme objectif principal le passage à trois composantes du réseau Sismalp. C'est dans ce contexte que nous avons développé la balise Sismalp 3, qui s'insère dans le réseau Sismalp et qui peut utiliser tous les outils informatiques qui ont été développés depuis dix ans.

La balise Sismalp 3 est, pourtant, un instrument complètement indépendant du réseau qui lui a donné naissance. Il s'agit d'un instrument trois composantes de grande dynamique (24 bits), de faible coût, de basse consommation (60 mA à 12 V, soit 720 mW) et qui peut s'adapter à plusieurs applications en sismologie grâce à la flexibilité de son architecture. Deux modes d'enregistrement peuvent coexister : l'enregistrement par déclenchement et l'enregistrement continu. Une utilisation optimale de sa mémoire vive (2 Moctets) est faite grâce à une compression en temps réel des données sismiques.

Une configuration plus performante de la station est aussi disponible. Elle s'appelle Sismalp 3 - PC et inclut une carte PC dans son architecture. Cette carte permet la connexion d'un disque dur PCMCIA de 340 Moctets. La contrainte de basse consommation a été respectée, car la carte PC et ses périphériques restent éteints pendant l'acquisition et l'enregistrement des événements.

L'inclusion d'une carte PC dans l'architecture de notre station ouvre des nouvelles alternatives dans les applications en sismologie. L'enregistrement continu dispose ainsi de la mémoire du support d'enregistrement du PC (un disque dur, un DAT, etc). D'autre part, la carte PC permet l'installation de programmes commerciaux, ou écrits par l'utilisateur, pour traiter les données sismiques sur place. Ces programmes peuvent être facilement développés dans un PC de bureau, utilisant tous les outils de haut niveau dont on dispose actuellement.

La balise Sismalp 3 apparaît donc comme une solution de faible coût et de basse consommation aux problèmes d'acquisition en moyenne et courte période. Il ne s'agit pas d'un instrument d'acquisition très large bande, à cause de la dynamique de son convertisseur (le AD7712)¹. Une autre limitation est imposée par l'absence d'un flux basse fréquence,

¹ Le AD7712 est un convertisseur sigma-delta. Cette technique de conversion introduit du bruit électronique dans les bits de poids faible des échantillons. Ce bruit est une fonction de la fréquence d'acquisition et du gain programmable de la voie. La dynamique réelle de la conversion est donc le nombre de bits qui restent après avoir enlevé le bruit de numérisation. Pour une fréquence d'acquisition de 100 Hz et un gain programmable égal à 1, la dynamique réelle est égale à 18 bits. Le tableau 2.1 du chapitre 2 montre la dynamique du convertisseur pour d'autres caractéristiques d'acquisition.

indispensable pour la détection de téléseismes. La balise Sismalp 3 peut être utilisée dans des réseaux régionaux ou globaux, permanents ou temporaires. Elle ne peut pas être utilisée dans des problèmes de géophysique appliquée ou de géotechnique, à cause de sa fréquence d'acquisition, qui est limitée à un maximum de 1010.5 Hz.

La balise Sismalp 3 est un instrument dans le sens complet du terme. Toute la chaîne d'acquisition est assurée grâce au programme de communications Sis3 (J. Revilla et J. Fréchet, 1996) et à la bibliothèque Sismalp (J. Fréchet et F. Thouvenot, 1986-1996). Une solution complète couvre l'acquisition de données, la communication avec la station sur le terrain, la communication à distance, par ligne téléphonique, la visualisation des événements, le traitement de l'information et l'intégration des événements à la base de données Sismalp. La balise Sismalp 3 peut être appelée de façon automatique par le gestionnaire de processus du réseau Sismalp. Actuellement, une tournée du réseau est faite toutes les nuits. Les événements sont récupérés et stockés dans des répertoires temporaires. Chaque matin, un opérateur rejette les enregistrements non sismiques, dépouille les données et incorpore les événements à la base de données Sismalp.

La balise Sismalp 3 utilise un format propre pour enregistrer les données. Ce format s'appelle SI3, il a été développé au laboratoire LGIT. Le format SI3 est très simple et très efficace, il peut être facilement converti en d'autres formats plus utilisés, comme le format SEED.

Les événements de la base de données Sismalp sont actuellement enregistrés sur des cartouches optiques de haute densité avec une capacité de 600 Moctets. Ces dispositifs assurent un enregistrement durable qui peut être facilement distribué. Les données sont accessibles sur demande. Les localisations des 20 derniers séismes enregistrés par le réseau sont disponibles avec la commande Unix « finger » (`finger sismalp@lgit.observ-gr.fr`). Les informations fournies sont : le nom du fichier, la date, l'heure, la localisation, la profondeur et la magnitude. J. Fréchet et F. Thouvenot travaillent actuellement sur un service Auto DRM (Data Request Management) qui sera accessible par Internet.

La balise Sismalp 3 peut devenir aussi une station multi-mesures. Actuellement, une quatrième voie est utilisée pour mesurer la tension d'alimentation et la température à l'intérieur de la balise. Cette voie dispose de deux canaux qui sont multiplexés sur un même convertisseur. On peut renoncer aux mesures précédentes et connecter d'autres capteurs sur la quatrième voie. Des mesures micro-barométriques ou la température du capteur pourraient être ainsi incorporées.

Les efforts de standardisation de l'information exigeraient l'utilisation d'un même matériel dans tous les réseaux participant dans un projet global. Cet objectif nous paraît difficile à atteindre. Les différents instituts et laboratoires utilisent du matériel obéissant à leurs besoins et à leur expérience particuliers. La solution à ce problème est la connaissance précise de la fonction de transfert des différents appareils.

Nous avons développé une procédure de calibration qui fait usage d'un signal électrique binaire pseudo-aléatoire généré par la balise (un échelon de courant peut être aussi commandé). Nous avons calculé la réponse paramétrique de notre chaîne d'acquisition et nous avons ensuite ajusté les paramètres aux résultats expérimentaux. Ce processus de calibration peut être exécuté de façon périodique et automatisée. La réponse instrumentale de notre chaîne sera incorporée aux données pour permettre l'intégration des événements Sismalp 3 dans d'autres réseaux.

Toutes ces caractéristiques font de la balise Sismalp 3 un instrument dans le sens le plus large du terme. Nous espérons que ce travail soit un apport dans la recherche de cette harmonie difficile à atteindre, l'équilibre entre les éléments qui constituent la base du phénomène scientifique : la science, le scientifique et l'instrument.

Chapitre 2 - Le développement de la balise Sismalp 3

Sismalp 3 est une balise trois composantes, grande dynamique (convertisseur 24 bits), basse consommation et faible coût. Elle a été construite autour d'une architecture souple et modulaire qui permet son utilisation dans les applications les plus diverses.

La balise Sismalp 3 dispose de trois canaux d'entrée à 24 bits. La fréquence d'acquisition peut être programmée entre 10 et 1010.5 Hz. Le gain de chaque voie peut être contrôlé par logiciel, huit valeurs sont disponibles, entre 1 et 128. Les données sismiques sont comprimées pendant l'acquisition avec un algorithme connu comme l'algorithme delta. Cette compression permet une optimisation de la mémoire vive, surtout en enregistrement continu. Dans ce dernier cas, des rapports de compression de 1 à 4, ou plus, peuvent être obtenus pour l'enregistrement du bruit sismique.

Deux modes d'enregistrement peuvent exister simultanément : l'enregistrement par déclenchement et l'enregistrement continu. Le premier mode utilise comme algorithme de détection le rapport STA/LTA (il existe aussi un algorithme de déclenchement alternatif : le dépassement d'un seuil fixe). Chaque fois qu'il y a une détection, un fichier événement est créé. D'autre part, l'enregistrement continu peut être déclenché et arrêté à volonté par l'utilisateur. Il utilise, comme unités minimum de stockage, des fichiers dont la taille en secondes doit être spécifiée par l'utilisateur. Chacun de ces fichiers constitue un événement indépendant.

La balise Sismalp 3 dispose d'une mémoire vive de 2 Moctets. L'utilisateur doit spécifier le pourcentage alloué au mode d'enregistrement par déclenchement et celui alloué au mode

d'enregistrement continu. Quand la mémoire vive de la balise est remplie, un événement est effacé pour faire de la place aux nouvelles données. Le critère utilisé pour sélectionner cet événement varie en fonction du mode d'enregistrement. Dans le cas de l'enregistrement continu, le fichier le plus ancien est effacé. Son espace mémoire devient alors un tampon tournant. Dans le cas de l'enregistrement par déclenchement, le fichier effacé est celui qui contient le séisme le moins important. L'importance d'un séisme est déterminée par son amplitude. L'amplitude est la moyenne des valeurs STA qui ont été calculées pendant l'enregistrement de l'événement.

Une version plus performante de la balise a été développée en rajoutant une carte PC et un disque dur à son architecture. On appelle cette version la configuration Sismalp 3 - PC. La gestion de la mémoire vive est différente dans ce cas. Quand la mémoire de l'un des modes d'enregistrement est remplie, un vidage sur disque dur est fait. L'autonomie de la balise devient donc celle du disque dur.

Pour réduire la consommation de l'ensemble, la carte PC et le disque dur ne sont alimentés que pendant un vidage. Ce même facteur exige que la transmission de données, entre la carte microprocesseur de la balise et la carte PC, se fasse de la façon la plus rapide possible. On a choisi pour cela une communication par bus. Comme les bus du microprocesseur de la balise (Motorola) et de la carte PC (Intel) sont incompatibles, on a développé une carte qui sert d'interface entre les deux standards. Grâce à cette carte, la mémoire vive de la balise peut être vidée en moins de 3 minutes, soit un taux de transfert de 15000 octets par seconde. On a appelé ce dispositif la carte ComBus, elle a été conçue par J. Revilla.

Quand le disque dur de la carte PC est plein, l'utilisateur doit faire une intervention sur le terrain pour l'échanger. Le disque dur de notre balise est du type PCMCIA, ce qui facilite son extraction et sa manipulation. En effet, ce format spécifie des disques avec une taille égale à celle d'une carte crédit (55 x 85 mm) et avec une épaisseur de quelques millimètres (10 mm). Les spécifications techniques des disques durs PCMCIA (leur taille, leur consommation, leur

résistance aux accélérations et leur facilité d'insertion) font d'eux un outil très intéressant pour les applications sur le terrain.

La communication entre l'utilisateur et la balise est assurée par un ensemble de 35 commandes de dialogue. Ces commandes permettent plusieurs opérations dont la modification des paramètres de la balise, la visualisation de l'acquisition en temps réel, le lancement de l'enregistrement continu, la récupération des événements enregistrés, la commande d'un enregistrement forcé, etc. Si l'envoi d'une commande de dialogue échoue, la balise répond avec un code d'erreur qui peut être interprété par l'utilisateur.

La balise dispose d'un port série pour établir la communication avec l'extérieur. L'utilisateur peut se servir d'un ordinateur portable pour communiquer avec la balise. La vitesse maximum de cette liaison est de 19200 bps, la limitation étant imposée par le microprocesseur de la balise.

Un modem fait partie de l'architecture de la balise. Grâce à ce dispositif, une communication peut être établie à distance, à travers le réseau téléphonique commuté. Dans ce cas, une nouvelle limitation de la vitesse de la communication est déterminée par le modem utilisé. La souplesse de l'architecture de notre balise permet l'utilisation de n'importe quel modem type Hayes. Dans notre configuration, on utilise un modem US Robotics, modèle World Port Lite. Notre modem est défini par les standards ITU-T V32 *bis*, ITU-T V42 et ITU-T V42 *bis*¹. La première norme définit une vitesse de communication de 2400 à 14400 bps. La deuxième et la troisième définissent des algorithmes de correction d'erreurs et de compression de données. Grâce à l'algorithme de compression, on peut atteindre une vitesse réelle de communication de 17000 bps (1700 octets par seconde).

¹ ITU-T (International Telecommunication Union - Télécommunication). Organisation qui définit les normes pour l'équipement télégraphique et téléphonique. Cet organisme était connu auparavant comme CCITT (Comité Consultatif International pour le Télégraphe et le Téléphone).

La balise dispose d'une commande de dialogue qui déclenche une procédure de calibration. La balise envoie alors un courant qui peut être appliqué sur la bobine de calibration du sismomètre. Deux types de signaux sont disponibles : l'échelon et le signal binaire pseudo-aléatoire. Ce dernier a été utilisé dans la procédure de calibration qui est présentée dans le chapitre 5.

L'horloge de la balise doit être synchronisée à une base de temps extérieure. Nous avons utilisé des récepteurs de temps Télécode qui se synchronisent au signal radio DCF. La balise décode l'heure et la date universelles au démarrage. La précision de l'heure est maintenue ensuite à une valeur de 1 milliseconde, par les tops seconde du récepteur. La balise compte avec un algorithme de décodage qui lui permet de détecter des faux tops et de se resynchroniser à la trame minute si besoin est.

Pour des endroits qui ne sont pas couverts par les horloges Télécode, une alternative est proposée par la société Leas. Il s'agit du récepteur Locsat qui se synchronise aux signaux satellites du système GPS (Global Positioning System).

Sismalp 3 est alimentée par une batterie de 12 volts. La consommation de la balise est de 60 mA, soit 720 mW. La configuration Sismalp 3-PC a une consommation un peu plus élevée, à cause de la carte PC et du disque dur. En effet, ces deux éléments consomment 9.5 W et 2.5 W respectivement. Or, ils sont alimentés seulement pendant le vidage des données, c'est-à-dire, 4 minutes toutes les deux heures. Ceci est équivalent à une consommation permanente de 400 mW pour la carte PC et le disque dur. La consommation permanente équivalente de la balise Sismalp 3-PC est donc égale à 1.12 W.

A cause de sa basse consommation et de son faible coût la balise Sismalp 3 fait le choix idéal pour les réseaux permanents, denses et reliés à une balise centrale par ligne téléphonique. Le réseau Sismalp (Fréchet et Thouvenot, 1986-1996) est un exemple de ce genre de réseaux.

D'autre part, la configuration Sismalp 3-PC est une alternative intéressante pour des applications autonomes, qui font un enregistrement par déclenchement ou continu. Grâce à la compression en ligne (algorithme delta) on peut obtenir un rapport de stockage de 1 Moctet par heure. Ceci donne à la balise une autonomie de 2 heures en configuration simplifiée et de 340 heures (deux semaines) en configuration PC. Cette limitation est déterminée par la taille du disque dur de la carte PC. En effet, actuellement on utilise des disques dur PCMCIA de 340 Moctets. Des disques durs PCMCIA de 130, 170 et 260 Moctets sont aussi disponibles.

La configuration Sismalp 3-PC ouvre des nouveaux horizons pour les applications en sismologie. En effet, n'importe quel périphérique PC pourrait être rajouté au système. On est en train d'étudier la possibilité de connecter un modem qui puisse être branché sur un appareil téléphonique mobile (GSM). Ceci permettrait des communications téléphoniques dans des endroits où les lignes physiques ne sont pas disponibles. Une autre application que l'on étudie maintenant est la connexion d'un DAT comme périphérique de stockage. Ceci augmenterait la capacité de notre balise à 2 gigaoctets, ce qui est équivalent à une autonomie de 2 à 3 mois.

L'utilisation d'une carte PC, enfin, permet le traitement des données sur place avec des programmes qui peuvent être écrits par l'utilisateur et incorporés facilement au système.

La balise Sismalp 3 a été développée dans le contexte d'un projet de collaboration entre le laboratoire LGIT et la société Leas, à St. Ismier. J. Revilla a participé dans l'élaboration du cahier des charges et dans les procédures de test et de débogage qui ont permis sa mise en opération. Il s'est aussi occupé de la conception de la carte ComBus. Le développement du reste du matériel a été responsabilité de la société Leas. Pascal Sulpice, a écrit le logiciel en langage assembleur qui contrôle le fonctionnement de la balise.

J. Revilla et J. Fréchet ont écrit le programme Sis3. Ce programme s'occupe de la communication entre l'utilisateur et la balise Sismalp 3. Sis3 a été développé en même temps

que la balise. Ceci a donné lieu à une interaction permanente qui a permis la mise en oeuvre d'un outil performant et fiable.

J. Revilla a aussi été responsable de la détermination du modèle paramétrique de la balise. Il a mis à point et il a exécuté une procédure de calibration qui permet la détermination expérimentale des paramètres de la chaîne d'acquisition (cf. le chapitre 5).

Francis Bondoux, Ingénieur d'Etudes à l'Orstom, a participé aux procédures de test de la configuration Sismalp 3 - PC. Ses conseils ont été très utiles dans les dernières étapes de la mise à point et du développement de la balise.

Ce chapitre décrit le développement de la balise Sismalp 3. Cette étude permet une connaissance approfondie de son architecture et de ses possibilités. Le paragraphe 2.1 présente l'aspect matériel de la balise. Le paragraphe 2.2 s'occupe des aspects les plus importants du logiciel écrit par P. Sulpice. La configuration Sismalp 3-PC est traitée dans le chapitre 4. En effet, l'étude de toutes ses possibilités requiert la connaissance du programme de communication Sis3 et de certains concepts qui sont présentés dans le chapitre 3.

2.1 La balise Sismalp 3 - Certains aspects du matériel

L'architecture de la balise est constituée de six blocs qui peuvent être étudiés séparément. Leur interaction est présentée sur la figure 2.1(a). Ces blocs sont :

- la carte d'acquisition,
- la carte microprocesseur,
- la mémoire vive de 2 Moctets,
- la carte de communication série,
- le modem,
- la carte d'alimentation.

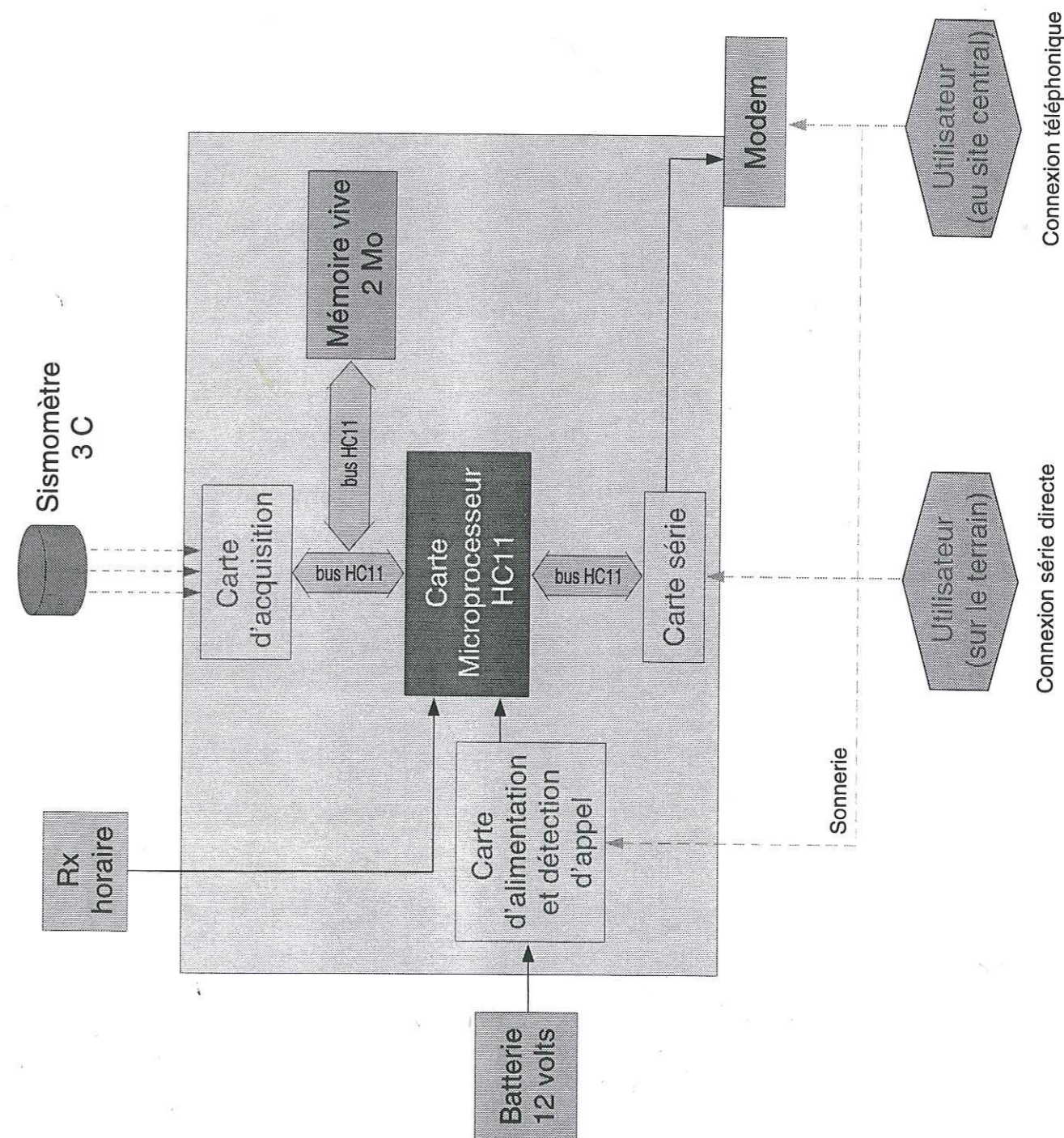


Figure 2.1 (a) - Architecture de la station Sismalp 3.

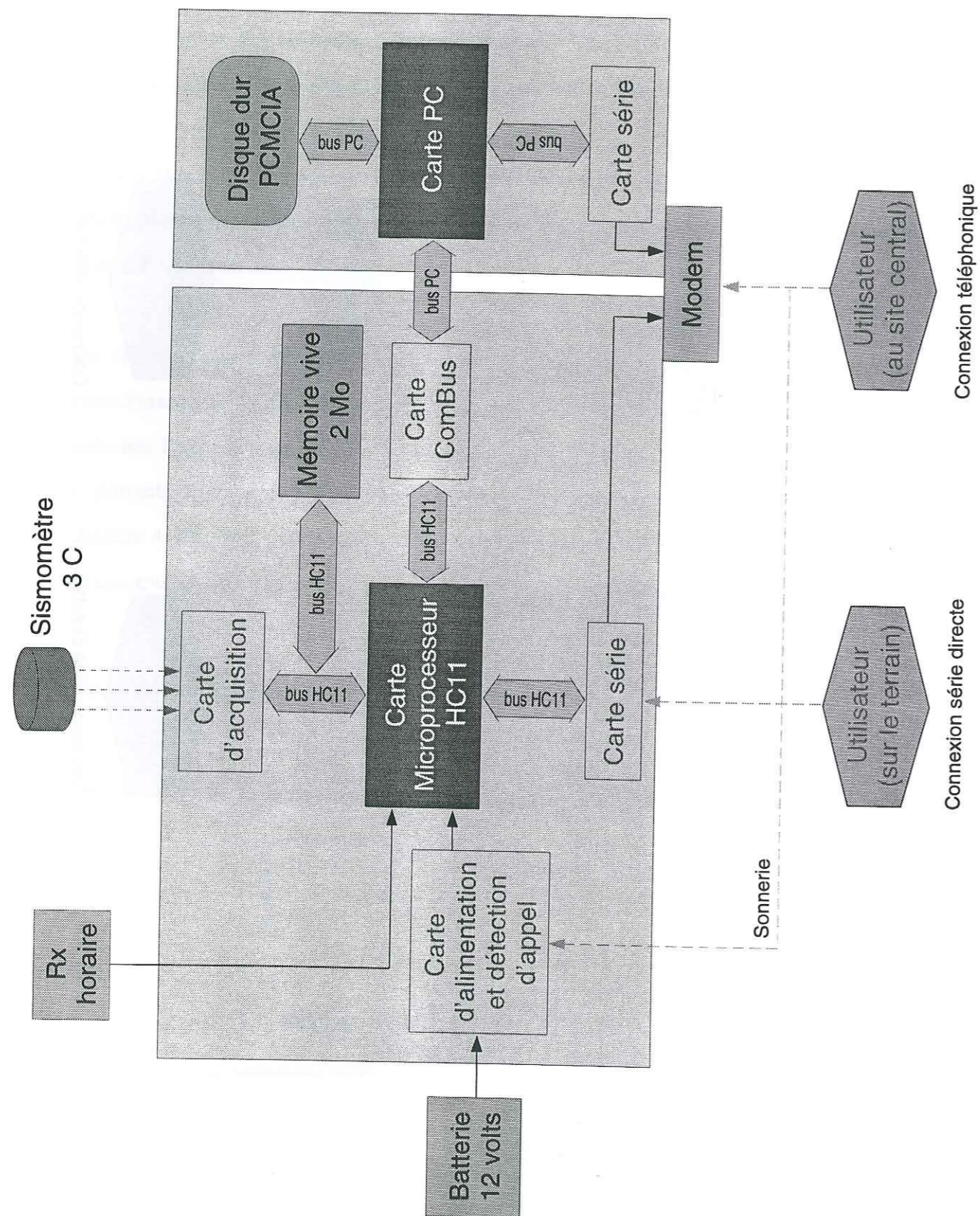


Figure 2.1(b) - Architecture de la station Sismalp 3 PC.

Ces blocs seront décrits en détail dans le texte qui suit. Il existe un bloc additionnel qui se trouve à l'extérieur de la balise. Il s'agit du récepteur horaire. A cause de son importance dans le fonctionnement de la balise il sera aussi étudié dans ce chapitre. L'algorithme de décodage des tops seconde est présenté dans le paragraphe 2.2.5.

La balise Sismalp 3 PC est une amélioration de la balise Sismalp 3. Les deux machines partagent la même architecture de base. La seule différence est l'incorporation de deux blocs additionnels : une carte PC avec des périphériques et la carte de communication ComBus. La figure 2.1(b) montre l'architecture de la balise Sismalp 3 PC. Cette configuration sera présentée dans le chapitre 4.

2.1.1 La carte d'acquisition

La carte d'acquisition a été développée autour de quatre convertisseurs analogiques numériques, type sigma-delta, AD7712 (Analog Devices). Chaque convertisseur a deux canaux d'entrée : un canal de niveau faible, de type différentiel, et un canal de niveau fort, non différentiel. On utilise les canaux faibles de trois convertisseurs pour créer trois entrées sismiques de 24 bits. La tension de la batterie est mesurée par le canal fort du quatrième convertisseur. La température à l'intérieur de la balise est mesurée par le canal faible. La figure 2.2 montre un schéma de blocs de la carte d'acquisition.

a). *Electronique de conditionnement analogique*

Avant la conversion, le signal doit passer par une étape de conditionnement électronique analogique. La figure 2.3 montre l'électronique de conditionnement du canal faible niveau et celle du canal fort niveau. L'électronique de conditionnement du canal faible niveau est constituée de quatre éléments indépendants : l'étape de protection, la résistance d'amortissement, l'amplificateur et le filtre d'anti-repliement.

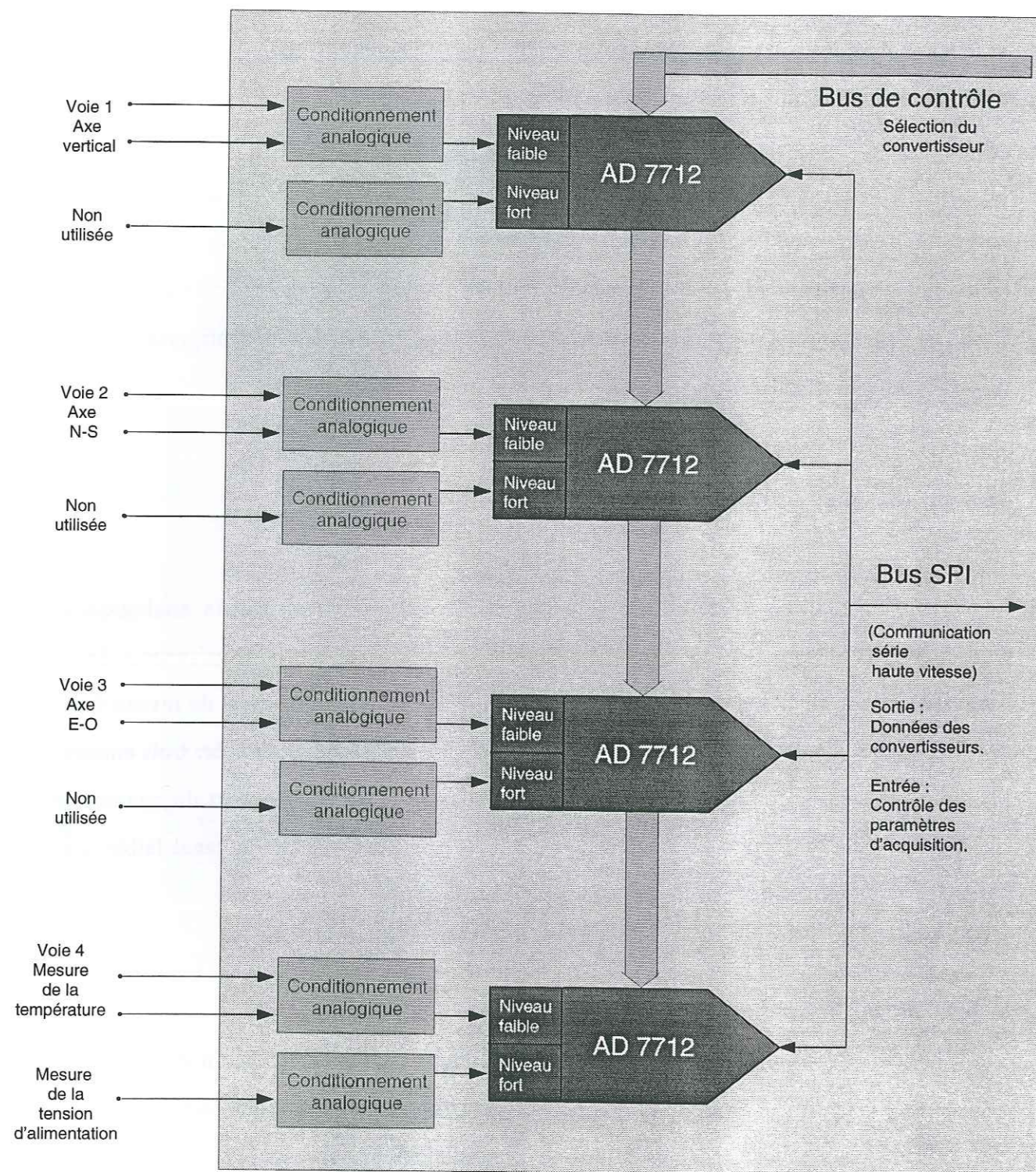
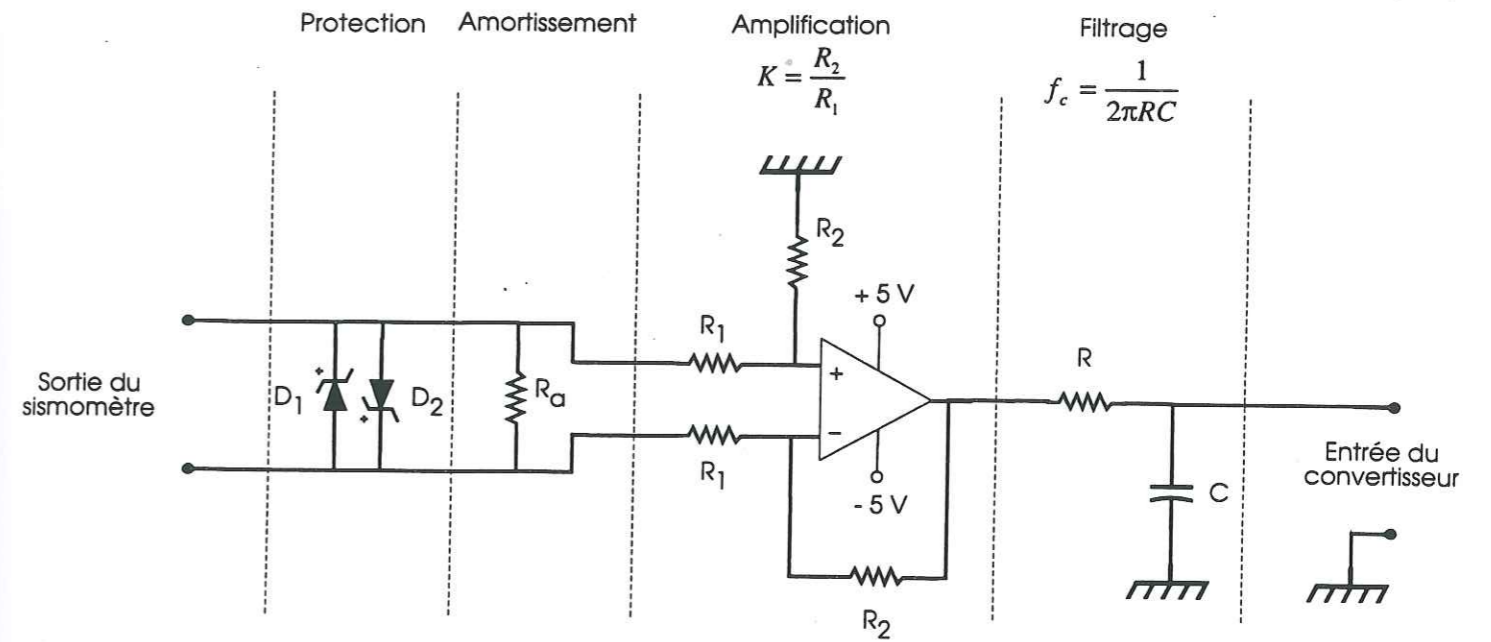
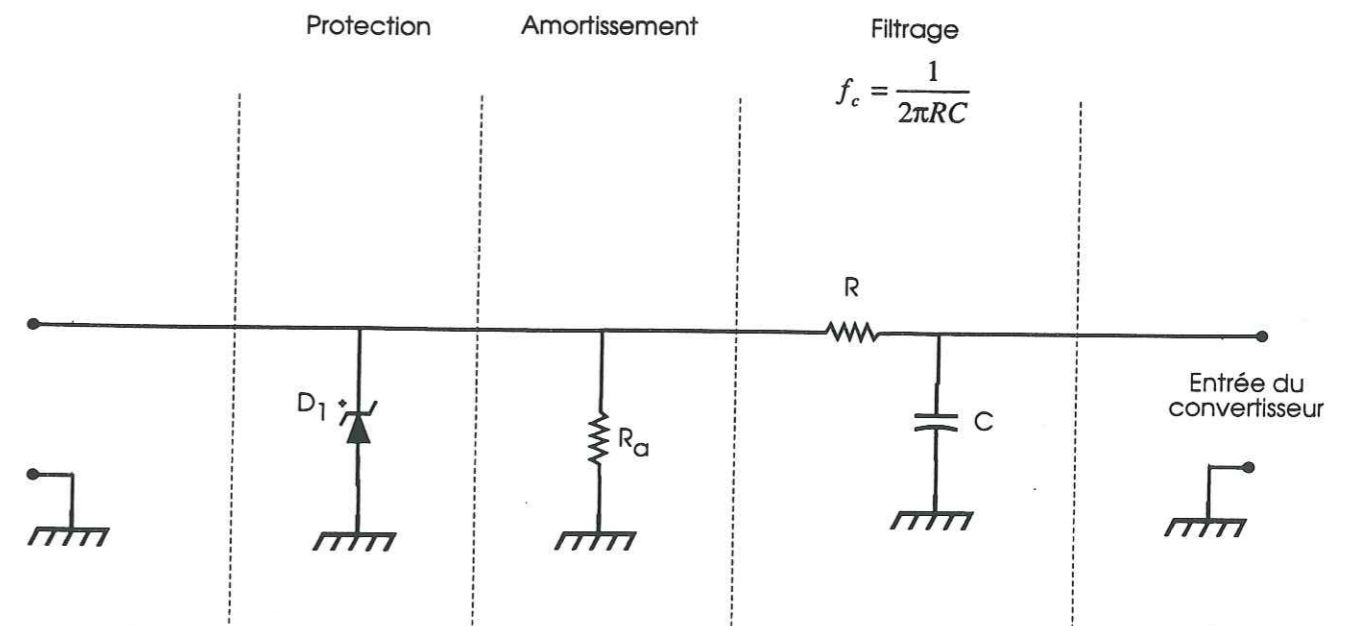


Figure 2.2 - Schéma de blocs de la carte d'acquisition.



Canal faible niveau



Canal fort niveau

Figure 2.3 - Electronique de conditionnement analogique. Canal faible niveau, canal fort niveau.

L'étape de protection est constituée de deux diodes zener en configuration antiparallèle. Ces composants deviennent des courts-circuits à partir d'une tension critique (phénomène d'avalanche). Les composants sont détériorés de façon irréversible, mais la surtension n'atteint pas le reste de la carte. Cette technique est très efficace pour éviter des tensions qui pourraient occasionner des dégâts dans l'électronique de conditionnement ou dans les convertisseurs. La tension maximum tolérée est de 20 volts.

La résistance d'amortissement doit être choisie en fonction du sismomètre utilisé et du type d'amortissement désiré. L'étape d'amplification est assurée par un amplificateur opérationnel Max 480 (fabriqué par la société Maxim). Le gain de cette étape dépend du rapport entre les résistances R1 et R2. Le gain peut être modifié en fonction du bruit sismique du site choisi. Nous utilisons un gain égal à 16 pour la plupart des balises. Le filtre d'anti-repliement est un filtre passe-bas d'un pôle qui a une fréquence de coupure égale à 2842 Hz. Cette fréquence de coupure est largement suffisante pour éviter le phénomène de repliement de spectre ou « aliasing », car le convertisseur fait un sur échantillonnage à 19200 Hz². Après un filtrage passe-bas numérique et une décimation, le convertisseur fournit les échantillons à une fréquence qui peut être choisie entre 10 et 1010.5 Hz.

L'électronique de conditionnement du canal fort est constituée de trois éléments indépendants : l'étape de protection, la résistance d'amortissement et le filtre d'anti-repliement. L'étape de protection est similaire au premier cas, mais avec une seule diode. La tension de protection est aussi égale à 20 volts. La résistance d'amortissement est optionnelle. Le filtre d'anti-repliement est similaire à celui du canal faible.

² Le sur échantillonnage, le filtrage passe-bas numérique et la décimation sont des caractéristiques de la technique de conversion sigma-delta.

b). Tension de saturation du convertisseur

Une fois que le conditionnement analogique a été fait le signal peut être appliqué sur les entrées du convertisseur analogique/numérique. La figure 2.4 montre un schéma de blocs du convertisseur. On peut distinguer la différence entre le canal de niveau faible et celui de niveau fort. Les deux canaux passent par un multiplexeur avant d'arriver sur l'amplificateur de gain programmable. Le canal de niveau faible rentre directement, tandis que celui de niveau fort passe par une étape d'atténuation. Comme résultat le canal de niveau faible sature à une tension égale à

$$V_S = \pm \frac{V_{REF}}{G} \quad (2.1)$$

Alors que le canal de niveau fort sature à une tension égale à

$$V_S = \pm 4 \times \frac{V_{REF}}{G} \quad (2.2)$$

G est le gain de l'amplificateur à gain programmable. Comme on l'a déjà dit, on applique les signaux sismiques sur les canaux de niveau faible, c'est-à-dire les canaux les plus sensibles.

c). Gain programmable

L'amplificateur de gain programmable (AGP) permet une amplification additionnelle du signal. Ce gain est contrôlé par logiciel et peut être modifié par l'utilisateur avec la commande de dialogue PROG (cf. paragraphe 2.2.7 et 3.2.1). Le gain AGP peut avoir huit valeurs entre 1 et 128 (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 et 128). Ce gain, ainsi que la fréquence d'acquisition déterminent la dynamique réelle de la conversion. Ceci est une conséquence de la technique sigma-delta et sera discuté plus loin.

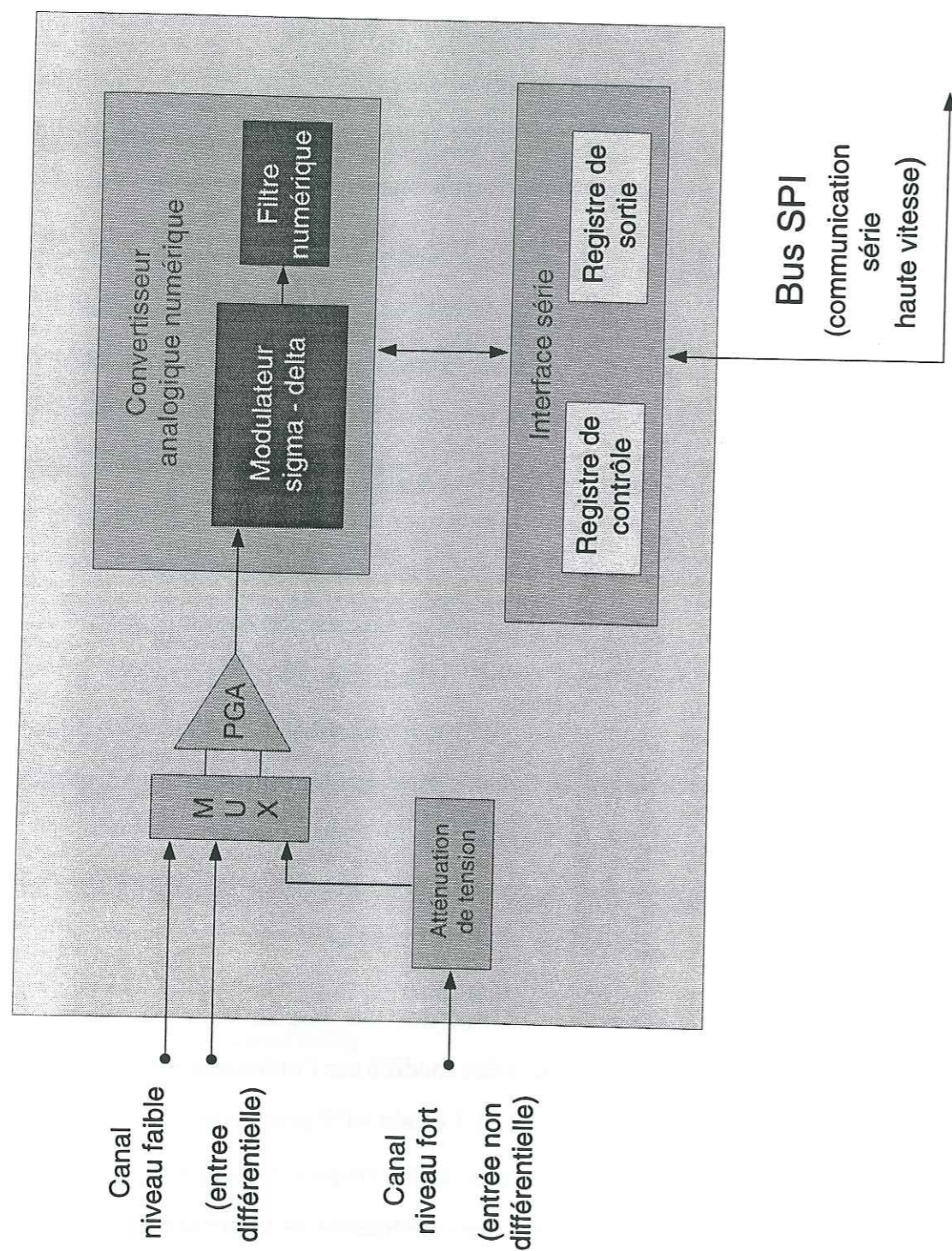


Figure 2.4 - Convertisseur analogique numérique AD7712.

d). Fréquence d'acquisition

La fréquence d'acquisition peut être programmée entre 10 et 1010.5 Hz. L'expression qui détermine la fréquence d'acquisition est

$$f_{acq} = \frac{\left(\frac{f_{CLK}}{512}\right)}{N} = \frac{19200}{N} \quad (2.3)$$

$f_{CLK} = 9830400\text{Hz}$ est la fréquence d'opération de l'horloge du convertisseur. N est un code qui est écrit sur un registre du convertisseur. Ce code a un format de 12 bits et peut avoir des valeurs entre 19 et 1920. Un filtrage numérique passe-bas est appliqué après la conversion. La fréquence de coupure de ce filtre est une fonction de la fréquence d'acquisition, elle est égale à

$$f_c = 0.262 f_{acq} \quad (2.4)$$

La réponse de ce filtre numérique est étudiée en détail dans le chapitre 5, paragraphe 5.5.3.

e). La dynamique réelle du convertisseur

La dynamique réelle de la conversion est déterminée par la fréquence d'acquisition et par le gain programmable. En effet, la conversion sigma-delta introduit un bruit de numérisation dans les bits de poids faible de chaque échantillon. Les échantillons sont fournis dans un format de 24 bits, mais le bruit de numérisation réduit leur dynamique réelle. Le tableau ci-dessous montre la dynamique réelle du convertisseur en fonction de la fréquence d'acquisition f_{acq} et du gain programmable G . f_c (-3 dB) est la fréquence de coupure du filtre numérique du convertisseur.

f_{acq} (Hz)	f_c (-3 dB) (Hz)	$G=1$	$G=2$	$G=4$	$G=8$	$G=16$	$G=32$	$G=64$	$G=128$
10	2.62	21.5	21.5	21.5	20.5	19.5	18.5	17.5	16.5
25	6.55	20	20	20	20	19.5	18.5	17.5	16.5
30	7.86	19.5	20	20	19.5	19.5	18.5	17.5	16.5
50	13.1	19.5	19.5	19.5	19.5	19	18.5	17.5	16.5
60	15.72	19	19.5	19.5	19.5	19	18.5	17.5	16.5
100	26.2	18.5	18.5	18.5	18.5	18	17.5	17	16
252.63	66.19	15	15	15.5	15.5	15.5	15.5	15	14.5
505.26	132.38	13	13	13	13	13	12.5	12.5	12.5
1010.53	264.76	10.5	10.5	11	11	11	10.5	10	10

Tableau 2.1 - Dynamique réelle du convertisseur AD7712.

f). Processus de conversion

La précision de la fréquence d'acquisition est déterminée par le quartz du convertisseur, qui est indépendant de celui de la carte microprocesseur. Le processus de conversion analogique/numérique se déroule de la façon décrite ci-dessous.

- i. Le convertisseur dispose d'une sortie logique pour indiquer la fin de la conversion. Cette sortie s'appelle DRDY. DRDY=0 indique qu'une donnée est prête.
- ii. Le microprocesseur reçoit une interruption toutes les millisecondes qui le force à vérifier l'état de la sortie DRDY. Ce genre de processus s'appelle scrutation ou « polling ».
- iii. Si DRDY=0 le microprocesseur lit la donnée.
- iv. La lecture de la donnée réarme la sortie DRDY (DRDY=1).
- v. Ce processus donne à l'acquisition une précision égale à 1 ms.

g). Mesure de la tension de la batterie et de la température à l'intérieur de la balise

Le quatrième convertisseur est utilisé pour mesurer la tension de la batterie et la température de la balise. La première mesure est faite avec le canal fort niveau, la deuxième avec le canal faible niveau. Ce convertisseur est programmé au démarrage pour faire une acquisition à une fréquence fixe, égale à 10 Hz. Le programme de gestion de l'acquisition valide le canal fort niveau et le canal faible niveau alternativement. Le changement est fait toutes les 0.5 secondes. Les valeurs qui sont lues à chaque fois (5 lectures) sont écrites dans deux registres. Quand l'utilisateur demandera la tension de la batterie (commande BATT) ou la température de la balise (commande TEMP), le programme de la balise lira ces registres.

La mesure de la tension de la batterie est faite avec une résolution de 9.5 microvolts. Le convertisseur sature à une tension de 20 volts, avec une dynamique de 21 bits. L'erreur commise est de 0.1 % maximum. On n'a pas fait une étude de l'évolution de cette erreur en fonction du temps et de la température environnante.

La température est déterminée en mesurant la sortie du capteur LM 35Z (National Semiconductors). Ce capteur fournit une tension qui est équivalente à la température, en degrés Celsius, après l'application d'un facteur d'échelle. Une tension de 250 mV est équivalente à une température de 25° C, une tension de 260 mV est équivalente à une température de 26 °C, et ainsi de suite.

Un autre facteur de correction intervient dans les deux mesures. Ce facteur corrige des différences subtiles que l'on a détectées entre les canaux fort niveau de plusieurs convertisseurs. En effet, le canal fort niveau utilise un pont diviseur (à l'intérieur du convertisseur) pour introduire une atténuation. La tension que subit le processus de conversion (V_e') est donc égale à une fraction de la tension à l'entrée du convertisseur (V_e).

$$V_s = V_e \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.5)$$

La différence qui doit être corrigée est due à des différences entre les valeurs de ces résistances. Pour résoudre ce problème on doit faire une calibration préliminaire de chaque convertisseur. Cette procédure de calibration consiste à introduire une tension de référence précise et à lire ensuite la valeur mesurée par le convertisseur. Cette valeur est utilisée pour calculer le facteur de correction. Elle est écrite dans un registre Eprom, sur la carte d'acquisition. Cet étalonnage est fait par la société Leas avant la livraison de chaque balise.

h). Correction de l'offset et du gain

Le convertisseur AD7712 comprend des registres et des procédures de calibration qui peuvent corriger des erreurs d'offset et de gain inhérentes au composant³. Ces erreurs sont associées à des changements de température ou de la tension d'alimentation. Deux registres de calibration sont accessibles à l'utilisateur. Le premier permet d'introduire une valeur qui sera enlevée à chaque échantillon pendant la conversion. Le deuxième contient une valeur de gain qui sera multipliée par l'échantillon pendant la conversion. Trois procédures de calibration sont disponibles : l'auto-calibration, la calibration du système et la calibration en tâche de fond.

Pendant une procédure d'auto-calibration le convertisseur connecte ses entrées à une tension de référence interne égale à 0 volts. Une fois que la correction a été faite, le convertisseur connecte ses entrées à une tension de référence interne égale à la V_{REF} , c'est-à-dire la tension de saturation du canal faible. La deuxième procédure de calibration (calibration du système) agit d'une façon similaire, la seule différence est que cette fois-ci l'utilisateur doit fournir, de l'extérieur, les tensions de référence. La calibration en tâche de fond est une procédure d'auto-calibration qui est exécutée à chaque conversion. Ce processus ralentit l'acquisition au sixième de la fréquence nominale.

³ Ne pas confondre avec l'opération de calibration décrite dans le chapitre 5.

Notre balise n'utilise pas les registres de calibration. Une procédure d'auto-calibration est exécutée après les opérations ci-dessous :

- une remise à zéro de la balise,
- le changement de la fréquence d'acquisition (commande PROG),
- le changement du gain programmable de l'une des voies (commande PROG).

i). D'autres aspects de la carte d'acquisition

Le canal de niveau faible du convertisseur dispose aussi d'une procédure intéressante pour vérifier si le dispositif qui se trouve connecté à son entrée est en bon état de fonctionnement. L'utilisateur peut valider un courant de 100 nA qui sera fourni par l'entrée du convertisseur. Le convertisseur devient ainsi une source de courant. Si le capteur ou l'amplificateur opérationnel connecté à l'entrée ont souffert un accident (court-circuit ou circuit ouvert), ceci sera mis en évidence par la valeur de la tension due au courant de test. La balise Sismalp 3 n'utilise pas cet avantage.

La carte d'acquisition dispose aussi d'une horloge alimentée par une pile indépendante du reste de la balise. L'heure et la date de la balise sont ainsi conservées, même si la balise est stockée pendant plusieurs mois.

2.1.3 La carte microprocesseur

La carte microprocesseur est le coeur de la balise Sismalp 3. Elle contient le microprocesseur et d'autres périphériques qui contrôlent le système d'acquisition.

Le microprocesseur de la balise est le MC68HC11 (appelé HC11 dorénavant), fabriqué par Motorola. Il s'agit d'un microprocesseur de basse consommation pour des applications générales. Il a un bus de données de 8 bits et un bus d'adresses de 16 bits. La technologie

HCMOS a été utilisée pour sa construction. Cette technologie mélange la basse consommation de la technologie CMOS avec la rapidité d'exécution de la technologie HMOS. La vitesse d'opération du microprocesseur est déterminée par une horloge externe de 12 MHz qui active une horloge interne de 3 MHz.

L'architecture du HC11 inclut plusieurs périphériques d'usage général dans le même circuit intégré. Ces périphériques sont présentés ci-dessous :

- une mémoire statique RAM de 256 octets,
- une interface série asynchrone,
- une interface série synchrone,
- huit canaux multiplexés de conversion analogique/numérique.

La mémoire RAM de 256 octets est utilisée comme un tampon d'accès rapide. Ce tampon contient des variables temporaires et des drapeaux qui indiquent les différents états de la balise.

L'interface série asynchrone est utilisée par la société Leas comme un port d'entrée/sortie pour exécuter des routines de test et de débogage. En effet, P. Sulpice a écrit un programme qui fait une évaluation de la mémoire vive de la balise. Ce programme permet aussi l'affichage des valeurs de certains registres du microprocesseur pendant son fonctionnement. La dernière fonction de ce programme est le calcul du facteur de correction utilisé dans la mesure de la tension d'alimentation.

L'interface série synchrone est un port type SPI (Serial Peripheral Interface). Ce standard de communication permet des échanges série à des vitesses qui ne pourraient pas être atteintes avec une interface asynchrone. Dans notre application, on l'utilise pour récupérer les données acquises par le convertisseur analogique/numérique. Elle permet aussi l'accès à l'horodateur (carte d'acquisition) qui garde l'heure et la date de la balise quand l'alimentation est déconnectée.

On n'a pas utilisé les canaux de conversion analogique/numérique du microprocesseur HC11. En effet, ce convertisseur ne répond pas à nos exigences techniques. La dynamique de la conversion est de 8 bits, celle que l'on acquiert avec le AD7712 est de 18 bits (100 Hz et AGP=1). Un autre problème est le manque de précision de la fréquence d'acquisition. Le AD7712 a un quartz qui contrôle de façon indépendante le processus d'acquisition. Le convertisseur du HC11 doit être commandé par le programme du microprocesseur. Arriver à une précision acceptable dans ce cas est difficile, à cause des autres tâches que le programme doit gérer. Pourtant, les huit entrées du convertisseur sont câblées, en prévoyant une possible utilisation dans le futur.

La carte microprocesseur contient aussi des périphériques extérieurs au circuit intégré HC11. Une RAM de 16 Koctets est disponible pour des calculs rapides pendant l'acquisition, une EPROM de 32 Koctets contient le logiciel de la balise et un décodeur permet l'accès à des périphériques sur d'autres cartes.

La carte microprocesseur compte aussi avec huit entrées et huit sorties logiques TTL (0 et 5 volts). L'usage des entrées et des sorties est décrit dans le tableau 2.2. Le numéro de la broche correspondante, sur le connecteur de la carte microprocesseur, est indiqué aussi. Les entrées et les sorties qui ne sont pas utilisées ne sont pas présentées.

2.1.4 La carte mémoire vive

Cette carte contient les composants qui se chargent du stockage de l'information. Elle est constituée par 16 circuits intégrés RAM de 128 Koctets chacun, c'est-à-dire un total de 2 Moctets (2097152 octets). La gestion de la mémoire vive est présentée dans le paragraphe 2.2.4.

N°	catégorie	Description
31	sortie	Validation de la mise sous tension de la carte PC (commande PCON).
32	sortie	Validation de la carte ComBus (communication balise - carte PC).
33	sortie	Validation de la mise sous tension du modem.
34	sortie	Calibration (commandes CAL1 et CAL2). Amplitude, bit 0.
35	sortie	Calibration (commandes CAL1 et CAL2). Amplitude, bit 1.
36	sortie	Calibration (commandes CAL1 et CAL2). Validation de l'amplitude.
37	sortie	Calibration (commandes CAL1 et CAL2). Signal de calibration.
38	sortie	DEL ⁴ de visualisation. Enregistrement en cours.
16	entrée	Détection de la sonnerie téléphonique.
17	entrée	Détection du bouton-poussoir pour la mise sous tension de la carte PC.

Tableau 2.2 - Entrée/sorties logiques de la carte microprocesseur.

⁴ DEL : diode électroluminescente.

2.1.5 La carte de communication série

La carte série permet la communication entre la balise Sismalp 3 et l'utilisateur. Sur le terrain, cette communication est une liaison directe faite avec l'aide d'un ordinateur portable. Les communications à distance passent par le réseau téléphonique commuté. La balise inclut un modem dans son architecture. Dans les deux cas, la communication est du type série asynchrone.

La vitesse de communication de la carte série est limitée à 19200 bps. Cette limitation est imposée par le microprocesseur de la balise, qui n'arrive pas à gérer des vitesses plus importantes. Dans le cas d'une communication par ligne téléphonique, une deuxième limitation est imposée par le type de modem utilisé.

Dans notre configuration, on utilise un modem à 14400 bps. Ce modem fait usage d'un algorithme de compression qui augmente la vitesse réelle de transmission. On obtient ainsi des débits de communication autour des 1700 octets par seconde.

La carte de communication série de la balise Sismalp 3 est construite autour d'une interface UART 6551 (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). Une interface UART convertit un mot de huit bits, en format parallèle (bus des données), en une suite qui sera transmise par une seule ligne (transmission série). L'interface rajoute des bits d'en-tête, d'arrêt et de contrôle de parité. L'ensemble est envoyé de façon asynchrone.

La carte série de la balise est définie par les normes ITU-T V24 et V28 (cet ensemble est similaire à la norme EIA RS232). En effet, ces normes définissent une communication asynchrone qui peut parcourir une dizaine de mètres sans amplification des lignes et des distances indéterminées avec l'aide des modems ou avec des amplificateurs de ligne.

Le protocole de communication utilisé pour la communication série est décrit dans le paragraphe 2.2.6.

2.1.6 Le modem

La balise Sismalp 3 a été développée autour d'une architecture souple qui respecte plusieurs standards de l'industrie. La balise Sismalp 3 est compatible avec tous les modems Hayes⁵ qu'on peut trouver sur le marché. En effet, le programme qui gère la communication entre la balise et le modem utilise seulement les commandes Hayes AT et ATA⁶. Il s'agit des deux commandes le plus simples. Ceci assure la compatibilité entre plusieurs marques de modems Hayes qui diffèrent, surtout, dans l'usage des commandes de plus haut niveau.

Nous avons choisi un modem US Robotics, World Port Lite. Ce modem respecte les normes ITU-T V32 *bis*, ITU-T V42 et ITU-T V42 *bis*. La première norme spécifie des communications jusqu'à une vitesse de 14400 bps. La deuxième spécifie des algorithmes de correction d'erreurs. La troisième définit des algorithmes qui permettent une compression des données. Les algorithmes de correction d'erreurs MNP 2-4 et de compression des données MNP 5⁷ peuvent aussi être utilisés. Grâce aux algorithmes de compression, la vitesse réelle de la communication peut atteindre un débit de 1700 octets par seconde. Un modem ITU-T V34 (28800 bps) pourrait aussi prendre en charge la communication.

La consommation de notre modem est égale à 260 mA sous 12 V (3.12 W), pendant une communication. La consommation en dehors d'une communication (en attente) est égale à 50

⁵ Hayes est le nom d'une société américaine qui avait établi un ensemble de commandes pour la communication entre l'utilisateur et son modem. Cette méthode de communication est utilisée maintenant par la plupart de fabricants. Malheureusement, aucune norme n'a été définie ci-dessus, ce qui empêche une vraie compatibilité.

⁶ La commande AT est utilisée pour vérifier l'état de la connexion. Si tout va bien le modem répond avec un message d'accusé de réception (« OK »). La commande ATA force une réponse manuelle à un appel téléphonique.

⁷ MNP : Microcom Networking Protocol, est un protocole de correction d'erreurs asynchrone développé par Microcom et désormais dans le domaine public. Le protocole MNP garantit des transmissions sans erreur grâce à la détection d'erreurs et à la retransmission des trames erronées. Les normes MNP 2-4 et MNP 5 sont incorporées dans la recommandation ITU-T V42 et V42 *bis*.

mA sous 12 V (0.6 W). Cette consommation est trop élevée pour alimenter le modem en permanence. Pour cette raison il est éteint hors des communications. La carte microprocesseur de la balise connecte l'alimentation du modem quand une sonnerie téléphonique est détectée. Le microprocesseur surveille la communication pour éviter des consommations inutiles d'énergie. En effet, l'alimentation du modem sera coupée si 60 secondes s'écoulent sans qu'une commande de dialogue soit envoyée par l'utilisateur.

L'évolution des systèmes téléphoniques mobiles et des liaisons satellite ouvre des nouveaux champs d'application aux balises Sismalp 3. Il existe déjà dans le commerce des modems qui peuvent être branchés sur un appareil téléphonique mobile (GSM). Cette alternative serait intéressante pour établir une communication téléphonique dans des endroits qui ne disposent pas de lignes physiques. Ce genre de modems n'a pas encore été testé avec notre balise. Or, cette application figure dans les axes d'évolution de notre système.

2.1.7 La carte d'alimentation

La carte d'alimentation convertit la tension de 12 volts fournie par la batterie en une tension de 5 volts nécessaire pour l'alimentation des composants de la balise. Elle protège aussi la balise contre la foudre et assure la remise à zéro du microprocesseur dans des situations de blocage. Ce dernier dispositif est connu comme un « chien de garde ».

La foudre est le phénomène responsable de la plupart des pannes dans un système d'acquisition relié au réseau téléphonique commuté. Les courants induits sur les lignes peuvent engendrer des tensions assez importantes sur les entrées de la balise. Les prises de terre installées par les compagnies de téléphone sont parfois insuffisantes. La carte d'alimentation contient un système complexe de filtres et d'éclateurs qui empêche le passage de courants parasites. D'un autre côté, la ligne téléphonique est isolée de la balise (sauf du circuit de détection de sonnerie) par des relais, en absence d'une communication.

La carte d'alimentation protège aussi la balise contre des situations de blocage qui pourraient l'isoler du monde extérieur. Un circuit compteur est activé quand il y a une détection de sonnerie téléphonique. Si le microprocesseur ne connecte pas l'alimentation du modem après 30 secondes de sonnerie on confirme une situation de blocage. La carte d'alimentation force alors une remise à zéro de la balise, ce qui doit annuler la situation de blocage.

La carte d'alimentation a aussi une fonction additionnelle. La balise dispose d'une seule entrée série pour les communications directes et pour les communications téléphoniques. Dans le premier cas, le port série est branché sur un connecteur extérieur, accessible à l'utilisateur sur le terrain. Dans le deuxième cas, il est connecté au modem. La première alternative est la situation par défaut. La carte d'alimentation est capable de détecter un appel téléphonique et d'aiguiller le port série vers le modem.

2.1.8 Le récepteur horaire

L'horloge de la balise Sismalp 3 n'a pas une précision acceptable pour des applications en sismologie. En effet, elle a une dérive égale à 12 millisecondes par minute. La précision de l'heure doit être donc assurée par une base de temps extérieure, synchronisée à l'heure universelle.

Nous avons utilisé des récepteurs de temps Télécode (Observatoire de Neuchâtel, Suisse) qui se synchronisent au signal radio DCF (77.5 kHz, Mainflingen, Allemagne). L'heure est fournie à la balise en format Télécode. Ce format est constitué par des tops seconde qui ont une précision de 1 milliseconde. Le flanc montant du top indique le début de la seconde. La durée du top peut avoir deux valeurs : 0.25 secondes ou 0.5 secondes. Ces deux valeurs sont utilisées pour faire un codage binaire sur 59 bits (0 et 1 logique). L'ensemble est une trame minute qui contient l'heure et la date universelle. La fin de la trame minute est indiquée par l'absence du top 59. La figure 2.5 montre une trame minute en format Télécode.

La balise décode cette trame minute, en permanence, pour déterminer la date et l'heure universelles. La précision de l'heure est maintenue par les tops seconde du récepteur.

Les horloges Télécode peuvent être configurées en usine pour se synchroniser à d'autres signaux radio. Les options disponibles actuellement sont : le signal HBG en Suisse, le signal MSF en Grande Bretagne et le signal WWVB aux Etats Unis. Pour des endroits qui ne sont pas couverts par ces émissions, une alternative est proposée par la société Leas. Il s'agit du récepteur Locsat qui se synchronise aux signaux satellites du système GPS (Global Positioning System). Ces récepteurs fournissent l'heure en format Télécode.

Chaque top seconde génère une interruption XIRQ (interruption exclusive) qui arrive directement sur le microprocesseur. L'interruption XIRQ ne peut pas être masquée, elle est donc traitée sans le moindre délai par le microprocesseur.

Le principal problème que l'on a rencontré lors du décodage des tops est l'apparition des bruits électriques. Ces bruits introduisent des faux tops. On a développé une méthode pour résoudre ce problème et pour commander une resynchronisation si c'est nécessaire. Cette méthode est présentée dans le paragraphe 2.2.5.

2.2 La balise Sismalp 3 - Certains aspects du logiciel

Le programme qui contrôle le fonctionnement de la balise Sismalp 3 a été écrit par Pascal Sulpice, de la société Leas. Le cahier des charges, le test et le débogage de certaines routines ont été faits en collaboration avec J. Revilla et J. Fréchet. Le programme est entièrement écrit en langage assembleur. Ce langage est difficile à manipuler, or il a permis des solutions efficaces et suffisamment rapides pour satisfaire nos exigences. Le code exécutable a une taille de 30 Koctets.

Le programme est assez complexe et sa présentation détaillée n'est pas le but de ce travail. Seulement certains aspects seront discutés, car ils illustrent les solutions que l'on a trouvées pour résoudre des problèmes qui se présentent dans le développement d'un système d'acquisition.

Le programme a comme objectif la gestion des tâches ci-dessous

- le contrôle du processus de conversion analogique/numérique,
- la détection d'événements sismiques (algorithme STA/LTA),
- le calcul de la moyenne des signaux,
- la compression en temps réel de l'information (algorithme Delta),
- le stockage des données et la gestion de l'espace mémoire,
- le décodage du signal horaire,
- le contrôle de la communication série,
- le contrôle de la communication bus PC,
- la mise en oeuvre du chien de garde.

Les aspects les plus importants du processus de conversion ont été déjà décrits dans le paragraphe 2.1.1. Le contrôle de la communication bus PC sera discuté dans le chapitre 4. Le reste des tâches sont présentées ci-dessous.

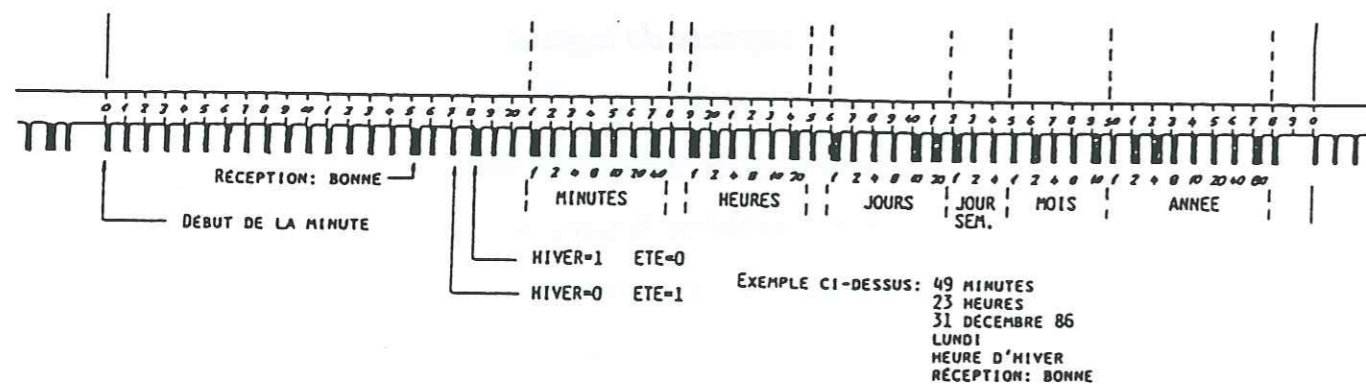


Figure 2.5 - Trame minute Télécode.

2.2.1 L'algorithme de détection STA/LTA

La détection des événements sismiques est faite avec l'algorithme *STA/LTA* (Short Term Average et Long Term Average)⁸. Cet algorithme est très fiable, il est utilisé dans plusieurs applications en sismologie. Les calculs impliqués peuvent être facilement réalisés en langage assembleur.

Les valeurs *STA* et *LTA* sont des moyennes de la valeur absolue du signal, calculées sur des différentes fenêtres. *STA* est une moyenne sur une fenêtre de temps courte, *LTA* est une moyenne sur une fenêtre longue. Leur rapport *R* détermine le niveau du signal par rapport au bruit de fond. Quand *R* dépasse un certain seuil *Q*, on dit qu'un déclenchement a eu lieu.

Les valeurs *STA* et *LTA* associées à un échantillon $x(i)$ sont calculées à partir des expressions ci-dessous :

$$STA(i) = STA(i-1) + k_{STA} (|x(i)| - STA(i-1)) \quad (2.6)$$

$$LTA(i) = LTA(i-1) + k_{LTA} (|x(i)| - LTA(i-1)) \quad (2.7)$$

Chaque équation représente un filtre passe-bas d'un pôle, dans le domaine du temps. Les constantes k_{STA} et k_{LTA} contrôlent la constante de temps de la fonction du filtre passe-bas. k est une fonction de la fréquence d'acquisition f_{acq} et de la longueur de la fenêtre considérée pour le calcul de la moyenne T .

$$k = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{1}{T \cdot f_{acq}}\right)} \quad (2.8)$$

k_{STA} et k_{LTA} sont deux des paramètres de la commande PROG. Cette commande permet la modification de tous les paramètres de fonctionnement de la balise.

La longueur des fenêtres T peut être exprimée en fonction de k .

$$T = -\frac{1}{\ln\left(1 - \frac{1}{k}\right) f_{acq}} \quad (2.9)$$

Un seuil *STA/LTA* est utilisé aussi pour déterminer la fin de l'événement. Dans ce cas, la valeur *LTA* est bloquée au début de l'événement. Une fois que ce seuil est franchi, le programme attend un temps donné avant de valider la fin de l'événement. Cet intervalle s'appelle « fenêtre de post-détection », il est l'un des paramètres de la commande PROG.

Un fichier séisme est construit avec les données qui se trouvent entre la détection du début et la détection de la fin de l'événement. Le programme rajoute un pré-événement et un post-événement. Leur taille en secondes est définie par l'utilisateur. L'utilisateur peut déterminer aussi une taille maximum et une taille minimum pour les événements. Toutes ces alternatives sont des paramètres de la commande PROG.

La valeur *STA* maximum qui a été calculée pendant l'enregistrement est écrite dans l'en-tête du séisme. En effet, cette valeur peut être utilisée comme un indicateur de l'importance de l'événement. Ce critère est utilisé pour l'effacement sélectif qui a lieu quand la mémoire allouée à l'enregistrement par déclenchement est remplie (configuration sans carte PC).

Les détections peuvent être faites sur une seule voie ou sur plusieurs. Dans le dernier cas, la condition sera remplie si toutes les voies sélectionnées déclenchent simultanément (« ET » logique) dans une fenêtre de longueur donnée. Cette fenêtre s'appelle « fenêtre de détection ». Elle est aussi un paramètre de la commande PROG.

⁸ En français MCT/MLT (Moyenne de Court Terme et Moyenne de Long Terme).

Pour un capteur courte période (1 Hz), on prendra, par exemple, une valeur T_{STA} égale à 2 secondes et une valeur T_{LTA} égale à 60 secondes. Le rapport STA/LTA pourra être égal à 4 pour le début de l'événement (selon le type de bruit de fond) et 1.5 pour sa fin.

2.2.2 Le calcul de la moyenne des signaux

Dans une acquisition analogique/numérique, une valeur constante se superpose toujours aux variations du signal. Ce décalage s'appelle « offset ». Il est dû à des déséquilibres électroniques qui n'ont pas pu être réglés avec la calibration des convertisseurs (décrite dans le paragraphe 2.1.2). L'offset doit être soustrait avant de calculer le rapport STA/LTA .

Pour déterminer l'offset on calcule la moyenne du signal sur une fenêtre de 65536 échantillons. On a développé une méthode assez pratique pour faire ce calcul avec un registre de 4 octets, un registre de 5 octets et un tampon tournant de 1024 octets par voie d'acquisition.

On utilise le registre de 4 octets pour additionner les valeurs échantillonnées jusqu'à avoir la somme de 256 échantillons. Cette valeur est additionnée après au registre de 5 octets qui contient la somme des 256 dernières sommes. La somme la plus ancienne est ensuite soustraite et la moyenne calculée en divisant le total par 65536. Finalement la somme la plus ancienne est effacée du tampon tournant et la dernière somme y est enregistrée.

Cette méthode donne comme résultat une moyenne, calculée sur 65536 échantillons, qui est actualisée tous les 256 échantillons. Le calcul de la moyenne se fait en permanence, même pendant l'enregistrement d'un événement sismique

2.2.3 La compression en temps réel Delta

La balise Sismalp 3 dispose d'une mémoire vive standard de 2 M octets. Cette mémoire est optimisée avec une compression des échantillons en temps réel. On utilise pour cela un algorithme de compression logique, connu comme « l'algorithme Delta ».

a). L'algorithme Delta

L'algorithme Delta fait une compression « logique » de l'information. Ce genre de compression utilise les valeurs des échantillons pour réduire l'espace de stockage requis. D'autres algorithmes font plutôt une compression « physique », ce qui consiste à manipuler les octets pour réduire l'espace de stockage, sans se soucier de l'information qu'ils représentent. La compression logique est très efficace pour le mode d'enregistrement continu. En effet, dans ce cas, la plupart de l'information représente du bruit sismique, et donc des données qui oscillent faiblement autour d'une valeur constante.

La compression Delta consiste à stocker la différence entre des échantillons successifs au lieu de stocker la valeur même des échantillons. On utilise un nombre de bits minimum pour stocker ces différences.

La balise Sismalp 3 dispose de trois voies d'acquisition. Chaque voie est associée à un convertisseur analogique numérique AD7712. Ces convertisseurs reçoivent comme entrée une tension analogique et fournissent comme sortie une suite d'octets. Chaque échantillon est représenté par trois octets, 23 bits pour la valeur et 1 bit pour le signe. La conversion sigma-delta introduit un bruit de numérisation qui se superpose aux bits de poids faible du mot de trois octets. Ce bruit est une fonction de la fréquence d'acquisition et du gain programmable.

Le bruit de numérisation détermine la vraie dynamique de la conversion. Une fréquence d'acquisition de 100 Hz et un gain programmable égal à 1 donneront comme résultat un bruit de numérisation égal à 6 bits. Ceci réduit la dynamique du convertisseur à 18 bits. Comme les

6 bits de poids faible ne contiennent pas d'information sismique, ils peuvent être masqués avant la compression de données. Ce masquage est une option que l'utilisateur peut choisir avec la commande de dialogue PROG.

Si l'option de masquage est habilitée, les bits de poids faible sont éliminés. Ensuite, un paquet de P échantillons est construit (par voie). Chaque paquet est comprimé de façon indépendante. P est un paramètre de la commande PROG. Il peut avoir une valeur égale à 64, 128, 256 ou 512. La valeur par défaut utilisée par la balise est 256.

Supposons qu'un paquet de P échantillons est représenté par la suite X .

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_P\} \quad (2.10)$$

La suite Δ contient les différences entre des échantillons successifs.

$$\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{P-1}\} \quad (2.11)$$

Avec $\delta_1 = x_2 - x_1$, $\delta_2 = x_3 - x_2$, $\delta_3 = x_4 - x_3$, ... , $\delta_{P-1} = x_P - x_{P-1}$.

On fait ensuite une recherche de l'élément δ_{max} . Cet élément est la valeur maximum de la suite, en prenant en compte le bit de signe. On peut maintenant déterminer le nombre de bits minimum, B , nécessaire pour stocker chaque élément de la suite X . Si δ_{max} est égal à 10, B sera égal à 5 ($2^4 = 16$, un bit pour le signe). Si δ_{max} est égal à -7, B sera égal à 4 ($2^3 = 8$, un bit pour le signe). La suite Δ est alors réécrite en utilisant B bits pour chaque élément. Les paquets de B bits sont placés les uns à côté des autres, réduisant ainsi le nombre d'octets nécessaires pour stocker la suite.

Le paquet est maintenant presque prêt pour le stockage. Il faut alors construire un en-tête de quatre octets qui contient l'information nécessaire pour la reconstruction du signal. Les trois

premiers octets représentent le premier échantillon x_1 . Le quatrième octet indique le nombre B .

Le nombre d'octets comprimés par paquet sera égal à

$$noc = 4 + ent\left(\frac{((P-1)*B)-1}{8}\right) + 1 = ent\left(\frac{39+(P-1)*B}{8}\right) \quad (2.12)$$

$ent(x/y)$ récupère la partie entière de la division.

b). Le rapport de compression R

Le rapport de compression R est défini par la formule ci-dessous.

$$R = \left(1 - \frac{noc * 8}{ntb}\right) \times 100 \quad (2.13)$$

noc est le nombre d'octets comprimés. Il s'agit de l'espace qu'occupe l'événement dans la mémoire de la balise.

ntb est le nombre total de bits sans bruit de numérisation. C'est le nombre de bits que l'événement aurait occupé, après enlèvement du bruit de numérisation et sans compression. Il est égal à la taille du paquet de compression P multiplié par le nombre de bits sans bruit de numérisation $nbsb$. $nbsb$ définit la dynamique réelle de la conversion, il est une fonction de la fréquence d'acquisition et du gain programmable (cf. le paragraphe 2.1.1).

Si l'on remplace la valeur de noc et de ntb on obtient :

$$R = \left(1 - \frac{39 + B*(P-1)}{P*nbsb} \right) \times 100 \quad (2.14)$$

La valeur de B dépend de l'information contenue dans le signal enregistré. La figure 2.6 montre la composante verticale de trois événements qui ont été acquis au site de Roselend, dans les Alpes françaises. Le premier est un séisme régional (80 km), le deuxième un télé-séisme et le troisième un enregistrement de bruit sismique. Le tableau 2.3 montre les valeurs de B , noc , $ntb/8$ (le nombre d'octets que l'événement aurait occupé sans bruit de numérisation) et R . La taille des paquets est égale à 256. $nbsb$ est égal à 18 ($f_{acq} = 100$, $G = 1$). La durée des trois événements est égale à 82 secondes.

Événement	B_{max}	B_{min}	$\langle B \rangle$	noc	$ntb/8$	R
1	15	5	10.7	10336	17280	40.2 %
2	7	6	6.1	5944	17280	65.6 %
3	5	3	4.1	4056	17280	76.5 %

Tableau 2.3 - Compression d'un séisme proche (80 km), d'un télé-séisme et du bruit sismique.

La méthode de compression Delta est très efficace pour des enregistrements de bruit sismique. Cette caractéristique est mise en valeur dans des enregistrements en mode continu. Les événements sismiques proches ne sont pas aussi bien comprimés parce qu'ils contiennent des

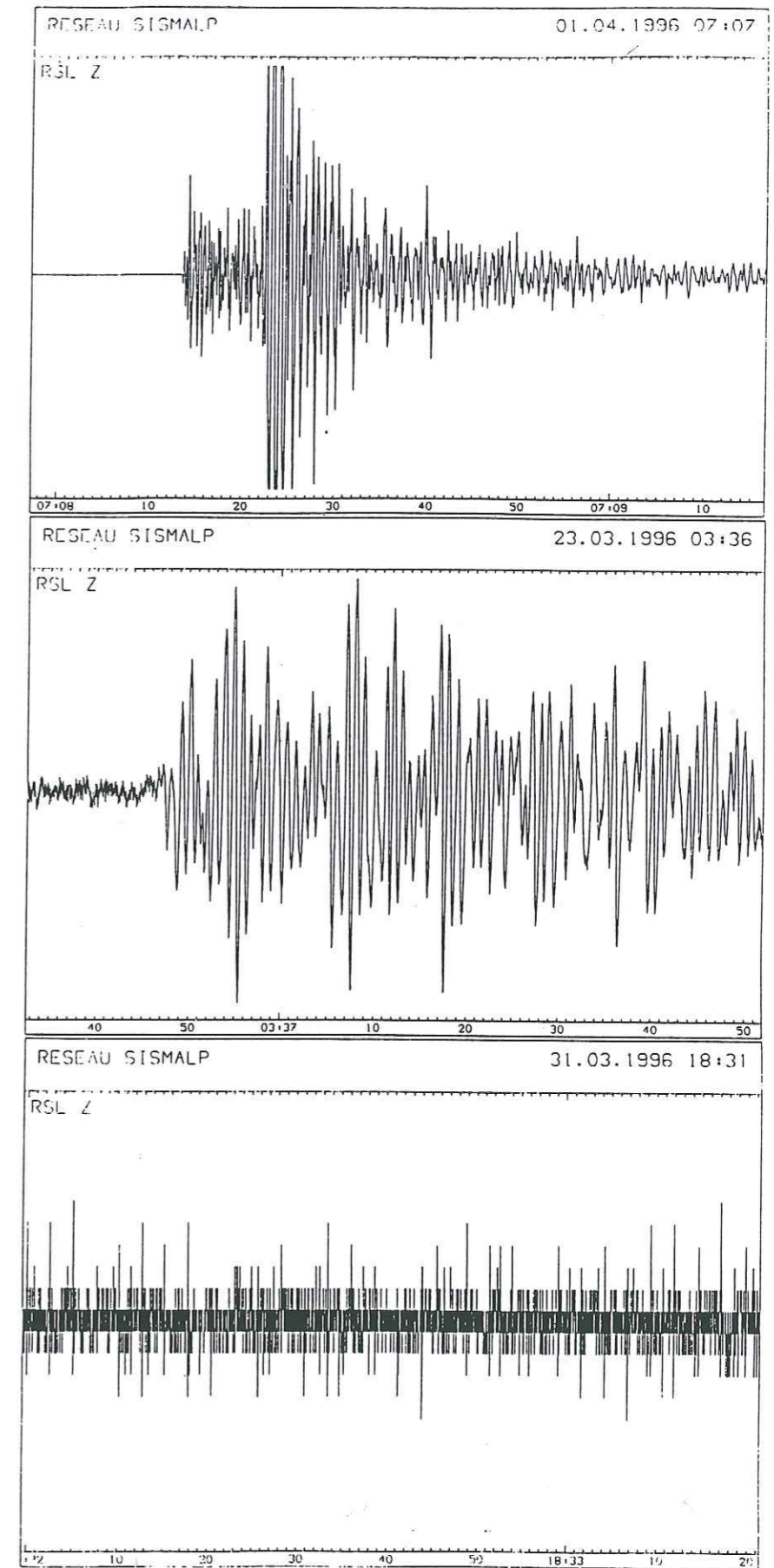


Figure 2.6 - Séisme régional (80 km), télé-séisme et bruit sismique.

variations brusques du signal. Les téléseismes ont un meilleur rapport de compression. La division de l'enregistrement en paquets de P échantillons permet une meilleure compression du pré-événement et de la coda.

c). Observations

L'utilisation de paquets pour la compression des données a une conséquence sur la taille des événements. En effet, cette dernière sera toujours un multiple de la taille des paquets. Si l'on fait une acquisition à une fréquence de 100 Hz et si l'on choisit $P = 256$, on aura des paquets avec une taille de 2.56 secondes.

Ce raisonnement peut être vérifié en faisant un enregistrement forcé de 10 secondes avec la commande RECO. On verra alors que la taille de l'événement sera égale à 12.8 secondes. Ceci parce que le début de l'enregistrement tombera au milieu de la construction d'un paquet et la fin aussi. Il y a une faible possibilité pour que la taille soit égale à 10.24 secondes, si le début de l'enregistrement a lieu à moins de 0.24 secondes après le début d'un paquet.

2.2.4 Le stockage des données et la gestion de la mémoire vive

La gestion de la mémoire est un sujet sensible duquel dépend l'efficacité de tout système d'acquisition.

La balise Sismalp 3 dispose d'une mémoire vive de 2 Mcoctets. Cette mémoire peut être partagée pour faire, simultanément, de l'enregistrement par déclenchement et de l'enregistrement continu. Le partage est défini par l'un des paramètres de la commande PROG.

Pour une meilleure gestion de la mémoire, on a divisé les 2 Mcoctets en 16 segments de 128 Kcoctets. Chaque segment est divisé en 16 sections de 8 Kcoctets. Chaque section en 4 blocs de 2 Kcoctets. Le bloc de 2 Kcoctets est l'unité minimum d'allocation. Il y en a donc 1024 au total.

a). Blocs réservés

Une zone de 96 blocs de 2 Kcoctets (192 Kcoctets) est réservée pour stocker des objets qui s'occupent de la gestion de la mémoire et du fonctionnement de la balise. Ces objets sont : la table d'allocation de fichiers (FAT), les boîtes aux lettres (commandes WBOX, RBOX et CBOX), les tampons tournants pour le stockage des pré-événements des trois voies et les entêtes des événements enregistrés.

Ces blocs occupent les 24 premières sections de la mémoire. Une description de la zone réservée est présentée dans le tableau 2.4. Le caractère « \$ » est utilisé pour indiquer que le chiffre qui suit est codé en système hexadécimal.

Cette distribution limite la taille du pré-événement à 40480 octets. Dans un cas typique de compression de bruit sismique ($R = 75\%$, cf. le tableau 2.3), ceci est égal à 540 secondes d'enregistrement.

b). Table d'allocation de fichiers (FAT)

La table d'allocation de fichiers (FAT) s'occupe de la gestion de la mémoire pour les deux modes d'enregistrement. Elle est constituée d'un ensemble de 1024 octets, qui se trouvent sur le premier bloc de la mémoire. Chaque octet est associé à un bloc de 2 Kcoctets de la mémoire vive. Les valeurs des octets de la FAT indiquent l'état de chaque bloc de la carte de 2 Mcoctets. Les codes utilisés sont montrés dans le tableau 2.5.

<i>Section</i>	<i>Description</i>
\$00	- Table d'allocation de fichiers (1024 octets). - Boîtes aux lettres (1024 octets). - 6144 octets libres.
\$01 - \$05	- Tampon tournant pour le stockage du pré-événement de la voie 1. Ces données sont comprimées (40480 octets).
\$06 - \$0A	- Tampon tournant pour le stockage du pré-événement de la voie 2. Ces données sont comprimées (40480 octets).
\$0B - \$0F	- Tampon tournant pour le stockage du pré-événement de la voie 3. Ces données sont comprimées (40480 octets).
\$10 - \$17	- En-têtes des événements sismiques. 928 en-têtes au maximum (8192 octets).

Tableau 2.4 - Zone réservée (192 Koctets).

<i>Code</i>	<i>Description</i>
\$00	- Le bloc est libre (mode déclenché).
\$01	- Le bloc est occupé (mode déclenché).
\$02	- Le bloc est protégé.
\$80	- Le bloc est libre (mode enregistrement continu).
\$81	- Le bloc est occupé (mode enregistrement continu).

Tableau 2.5 - Codes utilisés par la table d'allocation de fichiers (FAT).

c). Ecriture des blocs

L'écriture des blocs se fait de façon aléatoire. Chaque fois qu'une demande de mémoire est faite, le premier bloc libre sera occupé. Ceci peut donner place à une segmentation des événements, les données ne seront pas nécessairement écrites dans des blocs successifs. Les deux derniers octets de chaque bloc contiennent l'adresse du bloc suivant. De cette façon, les blocs peuvent être enchaînés pour une lecture, ou pour un effacement des données.

Le premier octet de l'adresse d'un bloc indique le numéro du segment de 128 Koctets. Le deuxième octet indique le numéro du bloc de 2 Koctets.

d). Enregistrement des données par déclenchement

Chaque fois qu'il y a un déclenchement, un événement est créé. Un événement est constitué d'un pré-événement, un corps et un post-événement. Le pré-événement est récupéré à partir des tampons tournants des zones protégées \$01 à \$0F. Le corps de l'événement est écrit ensuite et après le post-événement. L'en-tête est créé une fois que l'enregistrement est fini. Il est stocké dans la zone protégée \$10 à \$1F.

Les données se trouvent en format comprimé. La compression segmente les données en paquets de 256 échantillons (par défaut). Ces paquets sont enregistrés de façon multiplexée. Le premier paquet de la voie numéro 1 sera suivi par le premier paquet de la voie numéro 2. Celui-ci par le premier paquet de la voie numéro 3. Celui-ci par le deuxième paquet de la voie numéro 1, et ainsi de suite. Les paquets seront démultiplexés quand l'utilisateur demandera la transmission d'un événement (commande TRAN).

e). Enregistrement continu

L'enregistrement continu est constitué de fichiers indépendants qui se succèdent au fur et à mesure que l'enregistrement progresse. Ces fichiers sont des blocs minimum d'information qui peuvent être traités de façon indépendante. Chaque fichier a un en-tête similaire à ceux des événements enregistrés par déclenchement. Les données sont comprimées comme dans le cas antérieur et les paquets multiplexés. Les en-têtes sont stockés au même endroit que les en-têtes du mode d'enregistrement par déclenchement (la zone protégée \$10 à \$1F).

L'utilisateur doit définir la taille en secondes des fichiers d'enregistrement continu. Cette taille est l'un des paramètres de la commande PROG.

f). Gestion de la mémoire quand il n'y a plus d'espace libre

Quand l'une des deux zones mémoire est pleine, deux alternatives sont possibles. Dans la configuration Sismalp 3-PC, la carte PC est réveillée et toutes les données sont vidées sur disque dur. Dans la configuration sans carte PC, un effacement sélectif de la mémoire a lieu.

Le taux de remplissage qui déclenche un réveil de la carte PC peut être modifié par la commande PROG. La valeur par défaut est égale à 60%. Le taux de remplissage qui provoque un effacement sélectif de la mémoire (balise sans carte PC) est égal à 99%.

Le critère suivi pour choisir le (ou les) événement(s) à effacer est différent dans chaque mode d'enregistrement. Dans le cas de l'enregistrement continu, le fichier le plus ancien est effacé. Cette zone mémoire se comporte alors comme un tampon tournant. Dans le cas de l'enregistrement par déclenchement, le séisme le moins important est effacé. L'importance d'un séisme est associée à son amplitude. L'amplitude d'un événement est la valeur STA maximum qui a été calculée pendant l'enregistrement. Si plusieurs voies étaient validées, l'amplitude sera la moyenne des valeurs STA.

2.2.5 Le décodage du signal de temps (code Télécode)

Le récepteur utilisé par la balise Sismalp 3 fournit l'heure en format Télécode (cf. le paragraphe 2.1.8). La balise Sismalp 3 décode l'heure et la date universelles en permanence. La précision est maintenue par les tops seconde du récepteur.

Les tops seconde arrivent directement sur l'interruption XIRQ du microprocesseur. Ceci déclenche une interruption non masquable qui est prioritaire sur les autres tâches du microprocesseur.

Le principal problème que l'on a rencontré lors du décodage des tops est l'apparition des bruits électriques. Ceci introduit des faux tops. Le problème a été résolu avec une méthode simple mais efficace.

- a). Supposons que le dernier top a eu lieu à l'instant « 0 ». Le prochain top est donc attendu à l'instant « 1000 » (millisecondes). On définit un intervalle de tolérance 2ε , autour de l'instant « 1000 ». Cet intervalle est défini entre l'instant « $1000 - \varepsilon$ » et l'instant « $1000 + \varepsilon$ ».
- b). On compte le nombre de tops arrivés entre « 0 » et « $1000 - \varepsilon$ ». On appelle cette valeur *NTM* (nombre de tops mauvais).
- c). On compte ensuite le nombre de tops arrivés entre « $1000 - \varepsilon$ » et « $1000 + \varepsilon$ ». On appelle cette valeur *NTB* (nombre de tops bons).
- d). Au temps « $1000 + \varepsilon$ » on compare les valeurs *NTM* et *NTB*. Ces deux valeurs nous indiquent la situation dans laquelle on se trouve. Tous les cas possibles sont résumés dans le tableau 2.6.

NTM = 0 NTB = 1	Le top est valide.
NTB + NTM > 1	Signaux parasites.
NTM = 0 NTB = 0	Seconde 59.
NTM = 1 NTB = 0	Il y a eu perte de synchronisation. Si cette situation se répète 5 fois de façon successive, on force une resynchronisation.

Tableau 2.6 - Décodage du top seconde.

La valeur de ε que l'on utilise est égale à 20 millisecondes.

2.2.6 Le protocole de communication série

La communication série que l'on utilise suit d'une façon assez libre les recommandations ITU-T V24 et ITU-T V28. La première norme définit les fonctions des circuits de communication, la deuxième décrit leurs caractéristiques électriques. Ce genre de

communication est défini aussi par un standard émis par un autre organisme. Ce standard est connu sous le nom de EIA RS-232C⁹.

Une communication asynchrone se caractérise par l'utilisation des bits de début, d'arrêt et de contrôle de parité. Plusieurs configurations sont possibles. Celle que l'on a utilisée est montrée dans le tableau ci-dessous.

Bits des données	8
Parité	non
Bits de début	1
Bits d'arrêt	1

Tableau 2.7 - Configuration utilisée pour la communication série.

Le standard ITU-T V24 définit plusieurs lignes pour une communication série. Notre UART utilise certaines d'entre elles. Les lignes dont on dispose pour faire une communication sont montrées dans le tableau 2.8. On a préféré la nomenclature proposée par le standard EIA RS-232 C à celle du standard ITU-T V24. La première est la plus utilisée et décrit bien les fonctions des lignes.

⁹ EIA : Electronic Industries Association. Association qui définit des normes électroniques à l'intérieur des Etats-Unis.

Nom	Type	Description
Tx	sortie	Transmission.
Rx	entrée	Réception.
RTS	sortie	Demande permission pour transmission (Request To Send).
CTS	entrée	Reçoit permission pour transmission (Clear To Send).
GND	---	Masse.

Tableau 2.8 - Lignes utilisées pour la communication série.

Les lignes Rx et Tx sont utilisées pour l'envoi des données. Les lignes RTS et CTS facilitent le contrôle de la communication. Les lignes dans le tableau ci-dessus sont regroupées en paires (Rx-Tx et RTS-CTS). Chaque élément est le complémentaire de son couple.

L'interface série de la balise doit établir une communication avec l'interface série d'un ordinateur portable (connexion directe) ou avec celle d'un modem (communication par ligne

téléphonique). Les entrées de l'un reçoivent les sorties de l'autre. La connexion se fait alors par couples (Rx avec Tx, RTS avec CTS). La ligne GND est la ligne de retour de toutes les autres.

On utilise un protocole de contrôle de flux pour éviter des situations d'engorgement du côté de l'interlocuteur de la balise. La balise, par contre, ne peut pas expérimenter des situations d'engorgement. En effet, l'interlocuteur envoie seulement des commandes de dialogue. Il n'existe pas, donc, un grand flux de données vers la balise.

Le protocole de contrôle de flux utilise la ligne RTS (sortie) de l'interlocuteur, qui est connecté avec l'entrée CTS de la balise. L'utilisateur utilise donc cette ligne pour autoriser ou interdire l'envoi de données, à la balise.

Dans notre configuration, on utilise un modem qui permet une communication téléphonique à 14400 bps. Le contrôle de flux est alors nécessaire, car la communication entre la balise et le modem a lieu à 19200 bps. Le modem doit donc interdire à la balise d'envoyer des données, chaque fois que son tampon est plein.

2.2.7 Les commandes de dialogue

L'utilisateur dispose d'un ensemble de commandes de dialogue pour exploiter et programmer la balise Sismalp 3. Ces commandes sont représentées par des codes mnémotechniques qui font référence à leur fonction. L'anglais a été choisi pour la construction de ces codes.

La réception d'une commande déclenche l'exécution d'une action et l'envoi d'un message. Ce message confirme la tâche ou contient l'information sollicitée par l'utilisateur. Si la tâche n'a pas pu être accomplie, la balise renvoie un message d'erreur.

a). Description des commandes de dialogue

On présente ci-dessous la liste des 35 commandes de dialogue qui sont actuellement disponibles. Le code mnémotechnique de la commande est accompagné de l'action qui est déclenchée au niveau de la balise.

a.1. BATT - Mesure la tension de la batterie.

a.2. BCTN - Déclenche l'enregistrement continu.

a.3. CAL1 - Déclenche un processus de calibration. Le signal de calibration est un échelon de courant. La durée de l'échelon est introduite comme paramètre.

a.4. CAL2 - Déclenche un processus de calibration. Le signal de calibration est un courant binaire pseudo-aléatoire. Ce processus peut être programmé de façon périodique. Les paramètres de la commande sont : le germe de génération, l'intervalle minimum entre deux valeurs différentes (en nombre d'échantillons), la durée du signal, l'intervalle de répétition, le nombre d'opérations et d'autres paramètres qui concernent une calibration périodique.

a.5. CBOX - Efface le contenu d'une boîte aux lettres.

a.6. CLOC - Cette commande a plusieurs rôles. Elle peut être utilisée pour :

- Demander l'heure et la date de l'horloge de la balise.
- Changer l'heure et la date de l'horloge de la balise.
- Retrancher un nombre de secondes de l'heure de la balise.
- Ajouter un nombre de secondes à l'heure de la balise.

Les trois dernières options sont devenues maintenant obsolètes, car on fait un décodage permanent de la trame Télécode.

- a.7. CAOF - Fait une remise à zéro des opérations de calibration programmées.
- a.8. DCTN - Efface un ou plusieurs fichiers d'enregistrement continu.
- a.9. DELE - Efface un ou plusieurs fichiers d'enregistrement par déclenchement.
- a.10. IDEN - Demande le code d'identification de la balise, ainsi que le numéro de version de son logiciel.
- a.11. EXIT - Coupe la tension d'alimentation de la carte PC ou du modem.
- a.12. LCTN - Demande une liste de fichiers d'enregistrement continu.
- a.13. LIST - Demande une liste de fichiers d'enregistrement par déclenchement.
- a.14. MAPP - Demande des informations concernant l'utilisation de la mémoire vive de la balise. Les informations fournies sont : le nombre de blocs alloués à chaque mode d'enregistrement (continu et par déclenchement), le nombre de blocs occupés, le nombre de séismes enregistrés, l'heure et la date du début de l'enregistrement continu, l'heure et la date de la fin de l'enregistrement continu et un message qui indique si l'enregistrement continu est en cours.
- a.15. MODE - Demande les paramètres de fonctionnement de la balise.
- a.16. OFST - Demande l'offset des voies.
- a.17. PASS - Envoie le mot de passe de la balise.
- a.18. PCON - Connecte l'alimentation de la carte PC.

- a.19. PROG - Change les paramètres de fonctionnement de la balise.
- a.20. RBOX - Demande le contenu d'une boîte aux lettres.
- a.21. RECO - Déclenche un enregistrement forcé. Cette opération est interdite pendant l'enregistrement continu.
- a.22. RSET - Force une remise à zéro de la balise.
- a.23. SCTN - Arrête l'enregistrement continu.
- a.24. SKED - Demande des informations relatives aux opérations périodiques programmables : le réveil du PC et l'opération de calibration.
- a.25. STOP - Commande l'arrêt immédiat d'un processus de transmission de données.
- a.26. SYNC - Déclenche une opération de synchronisation.
- a.27. TCTN - Commande la transmission d'un ou de plusieurs fichiers d'enregistrement continu.
- a.28. TEMP - Mesure la température à l'intérieur de la balise.
- a.29. TEST - Commande la transmission d'un fichier test.
- a.30. TRAN - Commande la transmission d'un ou de plusieurs fichiers d'enregistrement par déclenchement.
- a.31. VIS1 - Commande l'envoi des échantillons acquis en temps réel. Les informations envoyées sont :

- les échantillons pour les trois voies,
- la date et l'heure avec une précision d'une milliseconde pour chaque jeu d'échantillons.

a.32. VIS2 - Commande l'envoi des échantillons acquis en temps réel. Les informations envoyées sont :

- les échantillons pour les trois voies,
- la date et l'heure avec une précision d'une milliseconde pour chaque jeu d'échantillons,
- l'offset de chaque voie,
- les valeurs STA et LTA de chaque voie.

a.33. WAKE - Programme un réveil périodique de la carte PC.

a.34. WAOF - Fait une remise à zéro du réveil périodique de la carte PC.

a.35. WBOX - Ecrit dans une boîte aux lettres.

b). Messages d'erreur

La balise envoie un code hexadécimal associé à un message. Le premier code indique que l'opération commandée a pu être exécutée avec succès. Les autres codes sont associés à des messages d'erreur ou d'avertissement.

- b.1. \$30 - L'opération a été exécutée avec succès.
- b.2. \$31 - Il n'y a pas d'événements sismiques en mémoire.
- b.3. \$32 - L'opération d'enregistrement forcée (commande RECO) est impossible, mode d'enregistrement continu en cours.
- b.4. \$33 - La voie n'existe pas dans l'événement demandé.

b.5. \$34 - La boîte aux lettres demandée n'existe pas.

b.6. \$35 - Il n'y a pas des données enregistrées en mode continu en mémoire.

b.7. \$36 - Le mode continu n'a pas été validé.

b.8. \$37 - Les nouveaux paramètres n'ont pas encore été validés.

b.9. \$38 - L'enregistrement continu n'a pas été validé.

b.10. \$39 - La commande de dialogue n'a pas pu être interprétée.

b.11. \$3A - L'événement demandé n'existe pas en mémoire.

b.12. \$3B - La commande envoyée est interdite pendant un enregistrement.

b.13. \$3C - La commande sera prise en compte à la fin de l'enregistrement.

b.14. \$3D - Une opération de calibration est déjà en cours.

b.15. \$3E - Commande impossible, car l'événement est encore protégé (faire LIST ou TRAN pour enlever la protection).

b.16. \$3F - Des nouveaux événements existent. Ils n'ont pas été effacés.

b.17. \$40 - Le mot de passe est incorrect.

b.18. \$41 - La commande de dialogue n'existe pas.

b.19. \$42 - L'introduction du mot de passe est obligatoire.

2.2.8 La mise en oeuvre du chien de garde

Le microprocesseur s'occupe aussi d'un système de sécurité qui évite la consommation inutile d'énergie. Ce dispositif de protection reçoit le nom de « chien de garde ».

On a déjà dit que la consommation du modem et de l'ensemble PC est trop importante par rapport à celle de la balise. Aussi, ces modules sont alimentés seulement pendant une communication ou un vidage de données. Une situation de blocage pendant l'une de ces opérations peut les laisser connectés en permanence, ce qui entraînerait une décharge de la batterie de 12 volts.

Pour éviter ce genre de situations, le microprocesseur a un compteur qui est réinitialisé chaque fois qu'une commande est reçue. Si 60 secondes s'écoulent sans réception de commande, on dit qu'une situation de blocage est arrivée. L'alimentation du modem ou de la carte PC sont alors interrompues et la communication ou le vidage terminés.

Chapitre 3 - Le programme de communication Sis3

Le programme Sis3 est un outil de haut niveau qui a été développé en même temps que la balise sismique Sismalp 3. Il est le moyen naturel pour communiquer avec la balise, permettant un accès rapide, logique et structuré à toutes ses fonctions. Une interface utilisateur graphique conviviale permet l'exploitation de toutes ses possibilités.

Sis3 est un programme indépendant. Il constitue, avec la balise, un binôme autonome qui fournit une solution flexible dans des applications diverses. Les événements sismiques sont fournis en trois formats : le format CMP, le format SI3 et le format SIS. Le premier est le format comprimé utilisé par la balise pour la construction des fichiers. Le deuxième est un format décomprimé propre au programme Sis3. Le troisième est le format utilisé par le système d'acquisition et traitement de données Sismalp, développé par Fréchet et Thouvenot (*op. cit.*). Trois programmes de conversion sont disponibles pour convertir les fichiers Sismalp dans d'autres formats. Sis2Sac convertit les données au format Sac (Seismic Analysis Code). Sis2Asc génère des fichiers en format ASCII. Sis2AH convertit les données au format AH de l'Observatoire de Lamont Doherty (Université de Columbia, Etats-Unis). D'autre part, le programme Asc2Sis convertit des fichiers en format ASCII au format Sismalp.

Le programme Sis3 devient un outil puissant quand il est incorporé au système Sismalp. Le système Sismalp a été développé pour gérer un ensemble de stations permanentes reliées à un site central par ligne téléphonique. Sis3 accomplit dans ce cas, le rôle d'interface entre le système Sismalp et les stations trois composantes Sismalp 3. Il peut, ainsi, faire partie d'un système d'appels automatisés, qui suit une routine programmée en avance. Les données

acquises par la balise Sismalp 3 et récupérées par le programme Sis3 peuvent être incorporées, ensuite, à la base de données Sismalp.

Le programme Sis3 a été écrit par Javier Revilla et par Julien Fréchet. Certaines unités ont été récupérées ou réécrites à partir des routines issues de la bibliothèque Sismalp. La mise en opération du programme Sis3 aurait été impossible sans l'aide de Pascal Sulpice, de la société Leas. Francis Bondoux, Ingénieur d'Etudes à l'Orstom, a participé aux dernières étapes des procédures de test et de mise à point.

Trois choix de départ ont défini les axes de développement du programme Sis3. Le premier concerne le langage utilisé pour l'écriture du code source. Le deuxième, le compilateur qui a construit le programme exécutable. Le troisième, la plate-forme de travail qui sert de support à notre programme.

Le code source du programme Sis3 a été écrit en langage Pascal. Le Pascal est un langage de programmation évolué et simple qui permet une écriture claire et structurée. Le C était aussi une alternative valable. Un souci de compatibilité nous a poussés vers le premier, car la bibliothèque du système Sismalp a été développée en Pascal. Ceci nous a permis l'utilisation directe de beaucoup d'unités et de procédures qui ont déjà dépassé les étapes de test et débogage. L'inclusion du programme Sis3 dans le système Sismalp a été presque automatique grâce à ce choix. Un dernier argument, non négligeable, est l'expérience solide qui a été acquise par le directeur de cette thèse, Julien Fréchet, dans l'utilisation du langage Pascal.

L'édition du code source et la compilation ont été faites avec l'outil Borland Pascal 7.01. Ce compilateur produit des codes efficaces et compacts. Il fournit aussi une bibliothèque d'usage général qui permet l'exécution de certaines tâches qui ne sont pas considérées dans la définition standard du langage Pascal. Parmi ces routines, on a certaines qui donnent accès à des niveaux très bas de l'ordinateur¹. Sans ce dernier avantage, notre programme n'aurait pas

¹ En informatique, les niveaux bas d'un ordinateur sont associés à son fonctionnement matériel. Les niveaux hauts s'éloignent du matériel pour se rapprocher de l'utilisateur. Le programme qui me permet d'écrire ce texte

pu être construit. Un dernier atout de ce compilateur est la possibilité de créer des codes exécutables en mode réel ou en mode protégé qui peuvent être appelés depuis les environnements MS-Dos ou Windows.

Nous avons utilisé un ordinateur compatible PC comme plate-forme de travail. Les raisons qui justifient notre choix sont liées aussi bien à des critères techniques qu'à l'état actuel du marché informatique. En effet, les ordinateurs PC sont construits autour d'une architecture ouverte et accessible à l'utilisateur. Bien que certaines informations soient gardées avec zèle, une vaste littérature discute les aspects techniques de leur fonctionnement. D'autre part, ces ordinateurs se sont imposés comme une norme non officielle dans les domaines de l'industrie et de la recherche. En conséquence, une multitude de logiciels et des périphériques compatibles PC peuvent être trouvés à des prix raisonnables.

Un autre argument de notre choix est la recherche de compatibilité avec le système Sismalp, qui utilise comme station centrale un ordinateur PC. Cette caractéristique fait du système Sismalp un outil accessible à des laboratoires qui ne comptent pas avec des budgets importants pour la construction de leur réseau.

L'une des configurations de la station Sismalp 3 (voir chapitre 4) considère l'implantation d'une carte PC à l'intérieur de la balise. Actuellement, des cartes compatibles PC de taille réduite et de basse consommation sont disponibles dans le marché. Il s'agit de modules qui peuvent être facilement inclus dans des systèmes de contrôle ou d'acquisition de données. A ce niveau, une autre norme non officielle s'est aussi imposée. Il s'agit du standard PC-104. La carte PC de notre balise peut appartenir à cette famille ou obéir aux standards qui définissent les cartes pour des PC de bureau.

est un outil de haut niveau. Le programme qui interprète les signaux électroniques envoyés par la souris est un outil de bas niveau. L'accès aux niveaux bas est fondamental pour des programmes qui souhaitent contrôler des périphériques, utiliser les interruptions générées par l'ordinateur et faire des modifications à la configuration standard du PC. Le plus bas le niveau, le plus haut le degré d'efficacité et la vitesse d'exécution d'un programme. Ecrire des programmes de bas niveau exige, pourtant, une certaine maîtrise de l'ordinateur utilisé.

Le programme Sis3 a été conçu pour être exécuté sur le système d'exploitation traditionnel des ordinateurs PC. Ce système s'appelle MS-Dos et il a été développé par la société nord-américaine Microsoft. Deux autres systèmes d'exploitation ont été développés postérieurement : le OS2 (IBM) et le système Windows (Microsoft). Nous avons choisi le premier parce qu'il est le plus répandu et qu'il nous permet d'accomplir tous nos objectifs. On a, ainsi, assuré la compatibilité et la simplicité du programme Sis3.

Le paragraphe 3.1 décrit l'architecture du programme Sis3. On présente les raisons qui nous ont menés à choisir une telle architecture et ses avantages. Le paragraphe 3.2 présente un aperçu du fonctionnement des trois versions du programme Sis3 : Sis3Mod, Sis3Dir et Sis3Bus. Le paragraphe 3.3 décrit l'interface utilisateur que l'on a développé pour faciliter l'interaction entre l'utilisateur et notre programme. Le paragraphe 3.4 décrit le programme principal. Le paragraphe 3.5 présente les procédures d'interruption Tim, Com, Bus et Cloc, qui augmentent l'efficacité et la fiabilité de notre programme. L'insertion du programme Sis3 dans le système Sismalp est traitée dans le paragraphe 3.6.

3.1 Architecture du programme Sis3

L'architecture du programme Sis3 a été conçue soigneusement afin de permettre la construction d'un outil efficace, simple, flexible, fiable et modulaire.

3.1.1 Efficacité - Procédures d'interruption

Une grande efficacité dans la gestion de ressources de l'ordinateur PC est obtenue grâce à une technique de programmation connue comme l'utilisation des procédures d'interruption. Les procédures d'interruption sont des routines indépendantes, qui sont déclenchées par des processus extérieurs au programme principal. Ces routines prennent en charge la gestion de

certaines tâches, en obéissant à un stimulus extérieur, qui peut venir de l'utilisateur ou d'un périphérique de l'ordinateur. Ceci libère le programme principal de certaines responsabilités et lui laisse du temps pour accomplir d'autres objectifs. Ce processus crée d'autre part, un niveau additionnel entre le programme principal et les périphériques de l'ordinateur. Il s'agit donc d'un niveau bas qui peut être entièrement contrôlé par le programmeur.

La technique des procédures d'interruption existe en opposition à une autre technique de programmation connue comme « polling ». Dans ce dernier cas, le programme principal s'occupe de toutes les tâches, la gestion de périphériques incluse. Comme le programme principal n'est pas capable de connaître le moment précis où la demande doit être attendue, il doit faire une supervision constante de tous les périphériques qui pourraient avoir besoin de ses services. Ceci ralentit son exécution, lui empêchant la prise en charge d'autres fonctions. La technique du « polling » mélange des hiérarchies et des processus qui devraient être indépendants.

L'utilisation de la technique de procédures d'interruption est un sujet assez délicat. Le programmeur doit avoir une connaissance approfondie de l'ordinateur et de ses routines de bas niveau. L'importance de la synchronisation des tâches dans les processus de bas niveau complique le débogage de ces procédures. Ceci ne permet qu'une utilisation partielle des outils de débogage fournis par le compilateur.

Le programme Sis3 compte avec quatre procédures d'interruption : Tim, Com, Bus et Cloc. La première accomplit un rôle de supervision de plusieurs processus, la deuxième participe dans la communication par port série, la troisième gère la communication par bus PC et la dernière est responsable de l'implantation d'un horloge synchronisé au temps universel, grâce à une base de temps fournie par un récepteur de temps. Ces procédures seront décrites avec détail dans le paragraphe 3.5.

3.1.2 Simplicité - Interface utilisateur et fichier d'initialisation

On a cherché à simplifier au maximum l'interaction entre l'utilisateur et le programme Sis3. Pour ce faire on a hérité de la bibliothèque Sismalp deux outils puissants : une interface utilisateur conviviale et simple et le concept du fichier d'initialisation.

L'interface utilisateur du programme Sis3 est une amélioration de l'interface utilisateur définie par la bibliothèque du système Sismalp. Il s'agit d'une interface graphique couleur, avec des menus déroulants et des touches raccourci, qui suit de près les standards définis par les interfaces Borland ou Windows. On fait un usage intensif de la souris. Or, si celle-ci n'est pas présente, des touches raccourci sont disponibles pour activer les différents menus ou pour exécuter directement certaines fonctions. Le même argument est valide pour l'usage de la couleur. Bien qu'elle soit un moyen intéressant de transmettre des informations on a pris soin de ne pas pénaliser l'utilisation de l'interface en mode monochrome.

La langue utilisée pour la transmission de messages est le français. Ces messages se trouvent réunis dans un fichier texte appelé SIS31.LNG. Ce fichier est indépendant du programme Sis3. Il est lu au moment du démarrage du programme Sis3. D'autres fichiers de messages peuvent coexister avec le fichier par défaut. Le basculement d'une langue à autre peut être fait sans sortir du programme. Actuellement, seulement la langue française est disponible. Parmi les développements futurs, on a prévu la création des fichiers langue en espagnol et en anglais.

L'interface utilisateur de la bibliothèque Sismalp est une interface graphique flexible et puissante qui a été testée et améliorée à plusieurs reprises. Elle est toujours une bonne alternative vis-à-vis des interfaces que l'on peut construire avec des bibliothèques que l'on trouve dans le marché.

Deux facteurs fondamentaux nous ont pénalisés dans l'utilisation des interfaces commerciales. Le premier est la nécessité de l'utilisation du mode graphique. La deuxième est

l'un des principes de base de notre architecture, c'est-à-dire l'utilisation du système d'exploitation MS-Dos comme plate-forme de notre programme. En effet, la plupart des interfaces commerciales sous MS-Dos sont des interfaces en mode texte. Le compilateur Borland Pascal 7.01 fournit une qui a cette caractéristique et qui a été construite dans la philosophie de la programmation objets, elle s'appelle Turbo Vision. Les outils pour construire des interfaces utilitaires graphiques que l'on a trouvés utilisent comme système d'exploitation le système Windows. Cette dernière alternative aurait donc attaché notre programme au système Windows, l'alourdissant et le faisant dépendre d'un environnement qui demande un coût et une complexité additionnels.

L'utilisation du mode graphique est imposée par l'une des fonctions du programme Sis3 : la visualisation en temps réel du signal sismique, avec la commande VISU. On aurait pu rester en mode texte pour l'ouverture des menus déroulants et passer au mode graphique pour l'exécution de la commande VISU. Or, on a observé qu'une telle opération produit une perte de quelques interruptions de l'horloge du PC. On a voulu éviter l'apparition répétitive de ce phénomène car on utilise l'horloge du PC pour gérer un certain nombre de tâches. D'autre part, une interface utilisateur entièrement graphique donne plus de souplesse aux interactions avec l'utilisateur. Ce mode permet la construction d'un outil riche en possibilités, avec une présentation agréable, même s'il est plus lent que le mode texte. Une dernière raison, enfin, pour utiliser l'interface utilisateur de la bibliothèque Sismalp, sont les avantages que l'on a quand on dispose du code source d'un outil informatique. En effet, ceci nous donne un contrôle total sur notre système. On a donc la capacité de modifier ou d'améliorer à volonté des routines qui pourraient imposer des contraintes au reste du programme.

Un autre aspect qui facilite la communication entre l'utilisateur et le programme Sis3 est le fichier d'initialisation SIS3.INI. Il s'agit d'un fichier texte qui contient certains paramètres qui définissent le fonctionnement du programme Sis3. L'utilisateur a ainsi la capacité d'adapter le fonctionnement du programme à ses propres besoins. Il peut configurer le programme Sis3, de l'extérieur et sans faire de modifications sur le code source. Certains des paramètres qui peuvent être modifiés de cette façon sont : la vitesse de la communication par port série, le

préfixe du numéro téléphonique de la station, le port utilisé pour la communication, le nom attribué aux canaux d'acquisition, le type de base de temps utilisée pour le maintien de l'heure du PC, etc. On peut aussi valider de cette façon certaines caractéristiques qui permettent le programme Sis3 d'interagir avec d'autres objets informatiques. On peut ainsi définir un fichier de sortie qui gardera le dialogue entre l'utilisateur et la station, ou un fichier d'entrée de commandes qui contiendra des commandes qui seront exécutées de façon automatique au démarrage.

Le paragraphe qui suit décrit les trois variantes du programme Sis3 : Sis3Mod, Sis3Dir et Sis3Bus. Il existe un fichier initialisation pour chacun de ces programmes : SIS3MOD.INI, SIS3DIR.INI et SIS3BUS.INI.

3.1.3 Flexibilité - Sis3Mod, Sis3Dir et Sis3Bus

On a cherché la flexibilité au moment de concevoir l'architecture du programme Sis3. Le résultat est un outil qui peut s'adapter facilement à des différentes exigences et contraintes.

Notre programme devait prendre en charge trois applications indépendantes :

- le contrôle d'une communication par ligne téléphonique avec une balise qui se trouve sur le terrain,
- la gestion d'une balise par liaison série pendant une opération sur le terrain,
- la gestion de la carte PC de la balise.

On a choisi de résoudre ces trois problèmes avec un seul code source. On utilise alors des directives de compilation qui génèrent trois programmes exécutables qui sont adaptés à chacun des problèmes mentionnés. Les trois programmes exécutables s'appellent Sis3Mod, pour une communication par modem, Sis3Dir, pour une communication directe par liaison série et Sis3Bus pour une communication par Bus PC, à travers la carte ComBus.

La différence entre ces trois programmes se trouve au niveau de la communication avec la balise Sismalp 3. Dans les deux premiers cas, la communication se fait à travers le port série de l'ordinateur. Or, Sis3Mod doit gérer un modem pour l'établissement de la communication téléphonique, alors que Sis3Dir passe par une communication directe. Bien que les différences ne soient pas fondamentales, on a conservé l'idée de deux programmes indépendants pour garder la simplicité et éviter des ambiguïtés. L'interface utilisateur du programme Sis3Mod contient un menu qui concerne les appels téléphoniques et la manipulation du modem. Le programme Sis3Bus, par contre, utilise le bus PC pour communiquer avec la station et le port série pour établir un dialogue direct, avec l'utilisateur, sans passer par la balise.

Tout le long de ce chapitre on utilisera la dénomination Sis3 pour parler des caractéristiques communes aux trois programmes. Quand il s'agira de caractéristiques particulières à chaque cas on utilisera le nom du programme concerné.

La flexibilité du programme Sis3 est liée aussi à son indépendance vis-à-vis des moyens matériels nécessaires. On a acquis cette caractéristique grâce à une utilisation rigoureuse des procédures standard. On a toujours utilisé des ressources disponibles dans tous les PC avec un microprocesseur 80286 et au-dessous. Malgré l'usage de la couleur que l'on fait au niveau de l'interface utilisateur, on a fait attention de ne pas pénaliser des applications avec des écrans monochromes. Le programme Sis3 peut fonctionner aussi avec une interface texte type MS-Dos. Cette alternative s'avère très utile dans le cas où une saisie à distance des commandes est nécessaire. Ce cas est étudié dans le chapitre 4, où l'on décrit une communication avec la carte PC de la balise, à travers un programme type Carbon Copy ou MS-Kermit.

3.1.4 Fiabilité - Compilation en mode protégé, outils de débogage

Le développement de tout programme informatique requiert le passage d'une période de test et de débogage afin de résoudre les situations conflictuelles qui n'ont pas pu être prévues par les programmeurs. Notre programme a dépassé ces étapes à plusieurs niveaux. On a fait des

tests des trois configurations au laboratoire et sur le terrain. On a fait des installations dans plusieurs sites des Alpes françaises pour tester le fonctionnement du système dans des conditions réelles. Beaucoup de problèmes ont été mis en évidence de cette façon.

Le programme Sis3 compte avec un outil de débogage qui est devenu indispensable pour résoudre des problèmes liés à la communication avec la station. Il s'agit d'un tampon en mémoire vive qui garde une copie de tous les octets qui sont échangés entre le programme et la balise. A la fin du programme ce tampon est vidé dans un fichier qui peut être étudié avec un éditeur de texte. Le tampon doit être suffisamment long pour permettre le suivi des opérations qui impliquent un flux important de données.

La fiabilité du programme est aussi améliorée grâce à une compilation en mode protégé. Le mode protégé est traité dans le paragraphe 3.1.6.

3.1.5 Modularité - Dispositifs d'entrée/sortie

Le programme Sis3 est un objet indépendant qui peut être utilisé par d'autres programmes de plus haut niveau. Cette fonction est assurée grâce à la possibilité que l'on a de définir plusieurs dispositifs d'entrée/sortie.

Trois dispositifs d'entrée sont disponibles : une entrée par clavier, à travers l'interface utilisateur ou l'interface texte type MS-Dos; une entrée par fichier de commandes et une entrée par ligne de commande. Le premier dispositif requiert la participation interactive de l'utilisateur. Le deuxième dispositif est un fichier texte (SIS3.INP) qui est lu au démarrage du programme Sis3. S'il est présent, les commandes qui y sont écrites seront exécutées de façon automatique. Le troisième dispositif est une ligne qui est rajoutée au nom du programme au moment de son invocation. Cette ligne est constituée par des raccourcis associés à chaque commande, ainsi que leurs paramètres. Un nombre indéfini de commandes peut être donc passé au programme Sis3 qui procédera à leur exécution avant de rendre la main à

l'utilisateur. Si la commande EXIT est rajoutée à la fin, l'opération s'achèvera avec la fermeture du programme Sis3.

Les deux derniers dispositifs ouvrent un champ très riche d'alternatives et d'applications. Le programme Sis3 peut être utilisé de cette façon comme un module par d'autres programmes de plus haut niveau. Ceci permet aussi une exécution automatique de certains processus après un réveil du PC. Dans ce cas le programme Sis3 sera exécuté depuis le fichier AUTOEXEC.BAT. Ces potentialités sont utilisées dans la gestion de la carte PC de la balise.

Parallèlement, deux dispositifs de sortie sont disponibles. Le premier est une sortie sur écran à travers l'interface utilisateur graphique ou texte type MS-Dos et le deuxième est une sortie sur fichier texte. La première alternative requiert une participation interactive de l'utilisateur. La deuxième est surtout utilisée dans les applications où une exécution automatique est nécessaire. L'utilisateur peut, de cette façon, étudier a posteriori le dialogue entre le PC et la station.

Les dispositifs d'entrée/sortie sont définis dans le fichier d'initialisation SIS3.INI.

La modularité du programme a été aussi assurée à l'intérieur du code source. On a utilisé les avantages du langage Pascal pour construire des procédures et des unités autonomes, qui permettent l'établissement de niveaux et de hiérarchies indépendantes.

3.1.6 Le mode protégé et l'architecture du programme Sis3

La fiabilité d'un programme peut être aussi augmentée par le mode utilisé pour sa compilation. Deux modes de compilation sont actuellement disponibles dans la plupart de compilateurs, dont le Borland Pascal 7.01 : le mode réel et le mode protégé.

Le mode réel est le mode traditionnel de compilation des programmes PC. Ce mode limite l'adressage mémoire d'un programme à une taille maximum de 1024 Koctets. Ce mode ne

considère pas la possibilité d'avoir deux ou plus de programmes qui s'exécutent simultanément. Aucun mécanisme n'est prévu pour éviter des possibles conflits dans l'utilisation de la mémoire de l'ordinateur.

Le mode de compilation protégé est une ruse qui a été introduite par les fabricants d'applications pour résoudre une limitation du système d'exploitation MS-Dos. En effet, le MS-Dos est un système mono tâche et mono utilisateur. Intel, le fabricant des microprocesseurs utilisés par l'ordinateur PC, a décidé d'inclure des possibilités multi tâche à partir de son microprocesseur 80286. Depuis, deux autres versions ont été présentées au marché : le 80386 et 80486, les deux avec des possibilités d'opération multi tâche. Malheureusement, Microsoft n'a pas voulu modifier son système d'exploitation. En effet, pour ce faire il aurait fallu le réécrire complètement. Pour résoudre cette contradiction les concepteurs de compilateurs ont créé le mode de compilation protégé.

Le mode de compilation protégé utilise la nouvelle méthode d'adressage de la mémoire du 80386 : l'adressage virtuel protégé. Ce mode d'adressage a apporté trois avantages :

- La possibilité d'adresser jusqu'à 16 Mo de mémoire.
- Un espace d'adressage logique plus grand que l'espace d'adressage physique. Ce qui est possible grâce à l'utilisation du disque dur comme mémoire intermédiaire.
- La possibilité d'isoler les programmes les uns des autres afin qu'un programme ne puisse pas perturber un autre s'exécutant simultanément.

Les avantages de la compilation en mode protégé du programme Sis3 se reflètent sur deux aspects : une augmentation de la fiabilité du programme et une augmentation des capacités d'interaction avec d'autres programmes.

Le premier point est lié à l'organisation de la mémoire, qui devient très rigoureuse en mode protégé. Certaines licences de programmation ne sont pas admises dans ce cas-là, évitant des

situations à risque. D'autre part, les messages d'erreur envoyés par le système d'exploitation sont plus explicites dans le cas d'une compilation en mode protégé.

La fiabilité du programme est aussi augmentée par les possibilités des outils de débogage du programme Sis3. Notre programme compte avec une option de débogage qui peut être définie le moment de son exécution. Ce mode d'opération crée un tampon de débogage qui reçoit tous les octets qui sont échangés entre le PC et la balise. Ce tampon est vidé dans un fichier à la fin du programme. Le fichier peut être ensuite étudié par l'utilisateur avec un éditeur de texte courant. On n'écrit pas les octets dans le fichier pendant la communication parce que ceci alourdirait un processus qui est très sensible. Le tampon de débogage occupe toute la mémoire disponible du PC. Si on compile en mode réel, la mémoire maximum qui peut être utilisée est de 640 Koctets, limitant fortement la taille du tampon et donc la puissance de l'outil. Si on compile en mode protégé, on pourra adresser toute la mémoire de l'ordinateur (jusqu'à un maximum de 16 Moctets).

Le deuxième aspect est lié aux capacités multi tâche des applications en mode protégé. Grâce à cela le programme Sis3 peut appeler sans aucune crainte le programme Pickev du système Sismalp pour faire une visualisation des données sismiques. Sis3 peut aussi être appelé par une autre application de plus haut niveau qui l'exécutera avec une ligne de commandes quelconque. Cette dernière alternative permet l'utilisation du programme Sis3 par le programme superviseur du système Sismalp (*op. cit.*) qui gère des communications téléphoniques automatisées. Le CEN (Centre d'Etudes de la Neige) a développé une application qui agit comme un gestionnaire du programme Sis3 (cf. le chapitre 6).

3.2 Fonctionnement des programmes Sis3Mod, Sis3Dir et Sis3Bus

Les figures 3.1, 3.2 et 3.3 décrivent la structure des programmes Sis3Mod, Sis3Dir et Sis3Bus. On peut distinguer les trois objets informatiques qui sont à la base de leur fonctionnement :

- le programme principal,
- les procédures d'interruption Com, Tim, Cloc et Bus,
- l'interface utilisateur.

Ces trois objets seront décrits avec détail dans les paragraphes 3.3, 3.4 et 3.5.

3.2.1 Le programme Sis3Mod

La figure 3.1 montre le fonctionnement du programme Sis3Mod. Ce programme a comme fonction la gestion de la communication téléphonique (par modem) avec la balise. Il est installé dans l'ordinateur PC qui se trouve au site central. L'utilisateur est représenté par une boîte rhomboïde, en haut du dessin. La balise Sismalp 3 se trouve sur le terrain.

Le programme principal contrôle l'ensemble des processus. L'utilisateur communique avec lui à travers l'interface utilisateur. Les procédures d'interruption s'occupent des tâches de bas niveau. La procédure Com gère la réception d'octets, pendant une communication série. Elle est activée par le port série du PC, qui est connecté au modem. La procédure Com travail avec trois tampons de réception, un tampon principal et deux auxiliaires. La procédure Tim est un gestionnaire de tâches qui est activé 18.2 fois par seconde par l'horloge du PC. L'une de ses tâches est de vider les tampons de réception sur le disque dur quand ils sont pleins ou quand la transmission est finie. La procédure Cloc gère l'horloge Sis3. Cette horloge est synchronisée à l'heure universelle. Les tops seconde sont fournis par une base de temps extérieure, qui est connectée au port parallèle de l'ordinateur.

Le disque dur du PC contient deux types de fichiers : les fichiers de données et les fichiers du programme Sis3Mod. Les fichiers de données sont construits par la balise et ils sont récupérés par transmission de données, avec la commande TRAN. La balise les a construits par déclenchement d'événement ou par enregistrement continu. L'utilisateur peut visualiser et traiter ces données avec le programme Pickev, qui peut être appelé directement, sans sortir du

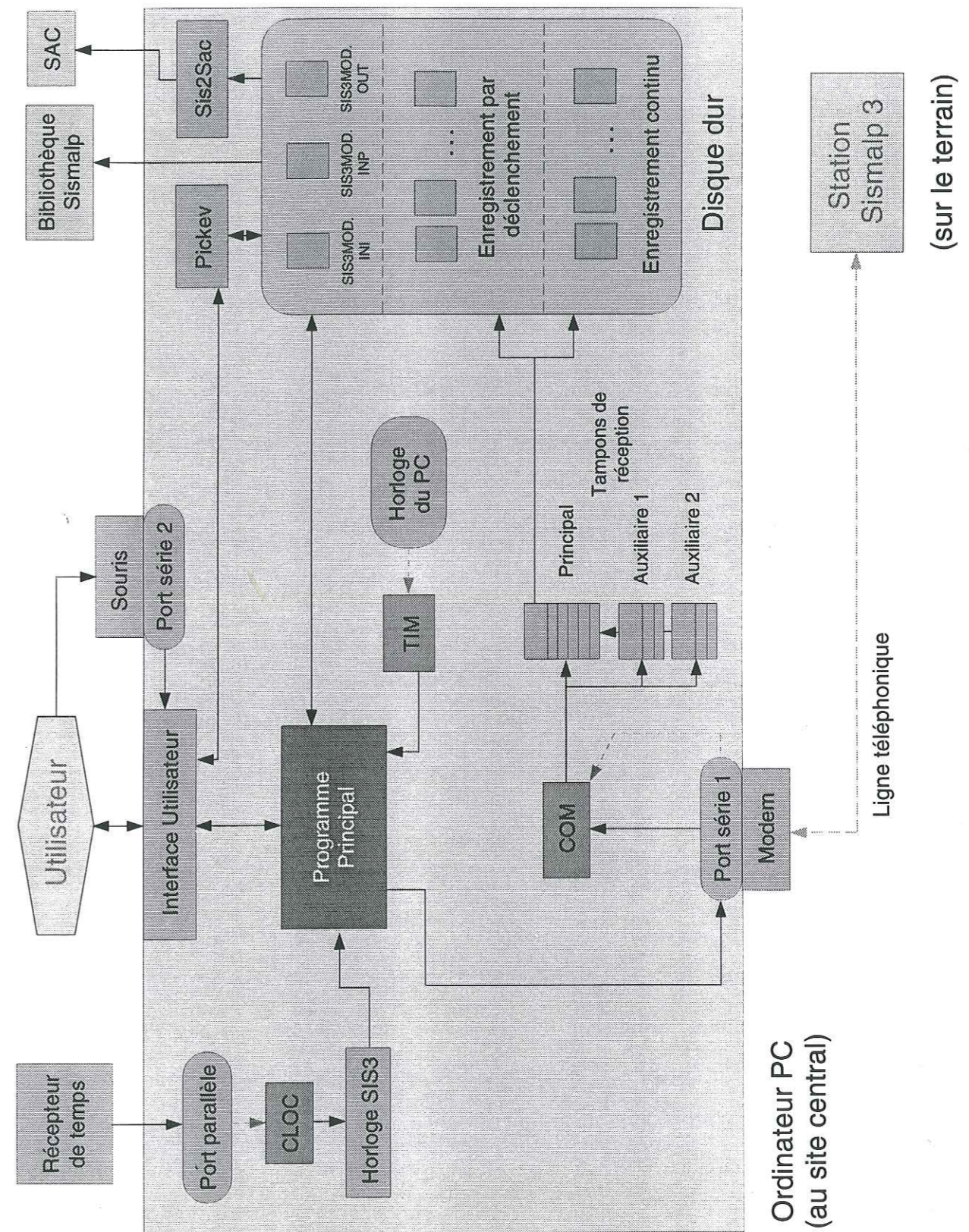


Figure 3.1 - Configuration Sis3Mod.

programme Sis3Mod. Les événements peuvent aussi être intégrés à la bibliothèque Sismalp. Cette bibliothèque contient une puissante base de données qui permet une manipulation efficace de l'information sismique.

Le programme Sis2Sac permet la conversion du format Sismalp au format Sac, ce qui ouvre des nouvelles possibilités au traitement des signaux sismiques.

Le programme Sis3Mod utilise plusieurs fichiers qui peuvent être configurés par l'utilisateur ou qui lui donnent des informations. Les plus importants sont décrits ci-dessous.

- SIS3MOD.INI. C'est le fichier d'initialisation. Il définit les options de fonctionnement du programme.
- SIS3MOD.INP. Ce fichier contient les commandes qui sont exécutées automatiquement, si l'exécution automatique est validée.
- SIS3MOD.OUT. Ce fichier contient la sortie texte du programme. Son activation annule la sortie sur écran.

Ces fichiers existent aussi dans les programmes Sis3Dir et Sis3Bus. Ils gardent la même extension.

3.2.2 Les programmes Sis3Dir et Sis3Bus

Le schéma 3.2 montre la configuration Sis3Dir. Ce programme s'occupe d'une communication directe avec la balise, à travers une liaison série. Dans ce cas, Sis3Dir est installé dans un ordinateur portable. Il peut être utilisé pendant une intervention sur le terrain ou au laboratoire dans les procédures de test ou de préparation des balises. Le fonctionnement du programme est similaire au cas précédent. Le menu **Modem** n'est pas disponible.

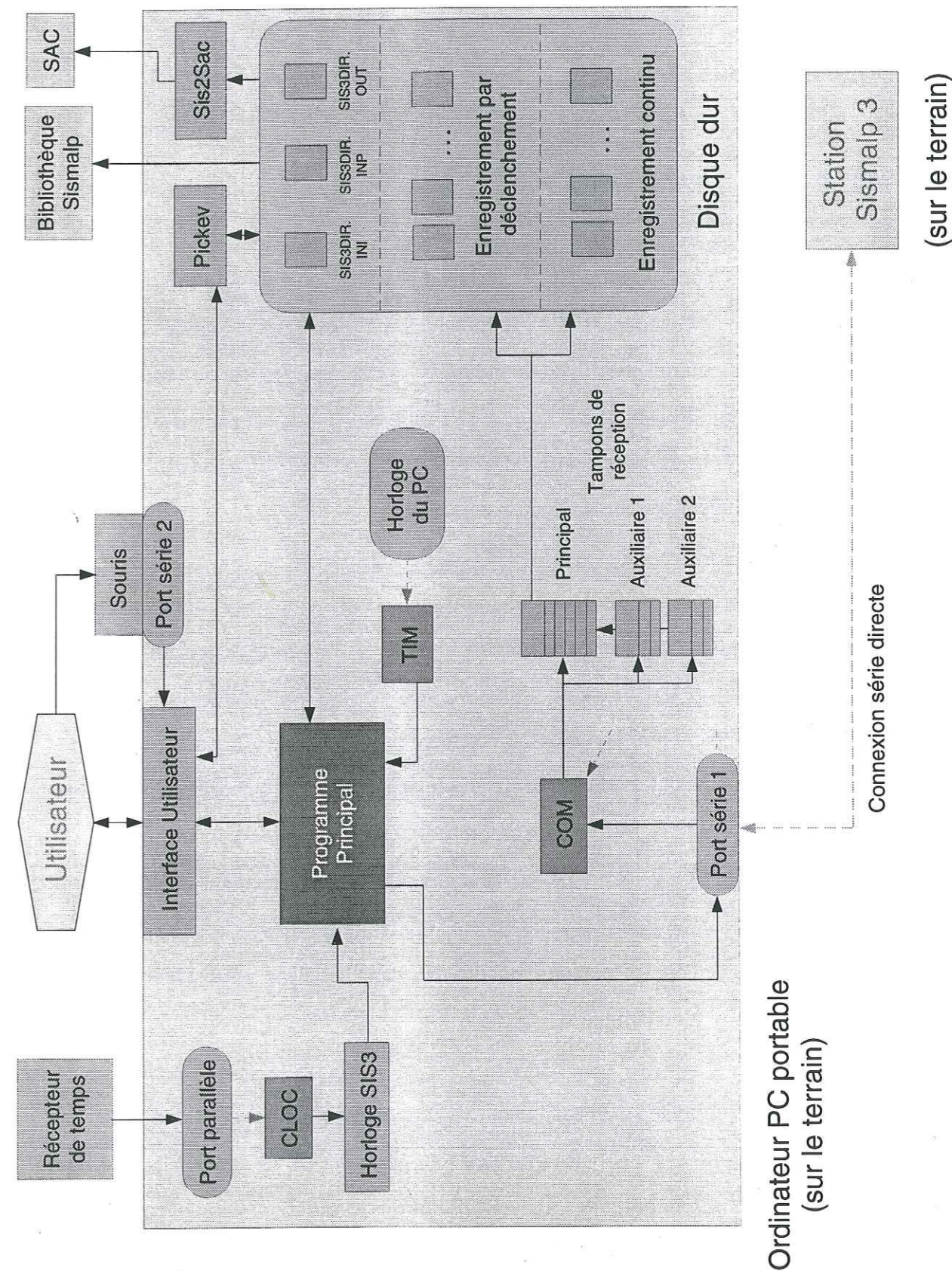


Figure 3.2 - Configuration Sis3Dir.

Le schéma 3.3 montre la configuration Sis3Bus. Ce programme a comme fonction le contrôle de la carte PC de la balise Sismalp 3 - PC. Le programme Sis3Bus sera étudié dans le chapitre 4.

3.3 L'interface utilisateur graphique

L'interface utilisateur graphique est un outil convivial et simple qui permet l'interaction entre l'utilisateur et le système Sismalp 3. Elle est constituée par une barre de menus déroulants, une barre de boutons raccourci, une ligne de messages d'aide, une fenêtre de visualisation et un gestionnaire d'erreurs. Si la synchronisation à l'heure universelle est activée, le temps est affiché dans le coin inférieur droit. Dans la figure 3.4 on présente l'interface utilisateur du programme Sis3Dir, après décodage de l'heure universelle.

Chaque menu déroulant contient plusieurs fonctions qui commandent des actions immédiates ou qui ouvrent des fenêtres pour l'introduction de données. L'utilisateur peut ainsi configurer l'interface, exécuter des programmes utilitaires ou envoyer des commandes vers la balise. Toutes ces fonctions peuvent être exécutées directement grâce à la barre de boutons raccourci. Autour de 15 boutons peuvent être créés par ligne. Plusieurs lignes de boutons sont possibles. La ligne de messages d'aide se trouve dans la partie inférieure de l'interface utilisateur. Elle apparaît chaque fois que l'on sélectionne une fonction. Le message contient une description rapide de la fonction. Chaque ligne est constituée d'un maximum de 80 caractères. Une fois qu'une fonction a été exécutée, les résultats sont affichés dans la fenêtre principale. Une flèche, à gauche indique la position de la ligne active.

L'interface utilisateur compte avec un gestionnaire d'erreurs qui prévient et guide l'utilisateur dans des situations de conflit. Trois types d'erreurs sont gérés par ce gestionnaire. Les erreurs de niveau 1 sont les moins importantes, ils sont plutôt des avertissements. Un message est affiché dans la fenêtre principale. Ceci n'interrompt l'exécution en cours. Les erreurs de niveau 2 provoquent l'ouverture d'une boîte d'erreur. Cette boîte est une fenêtre rouge qui

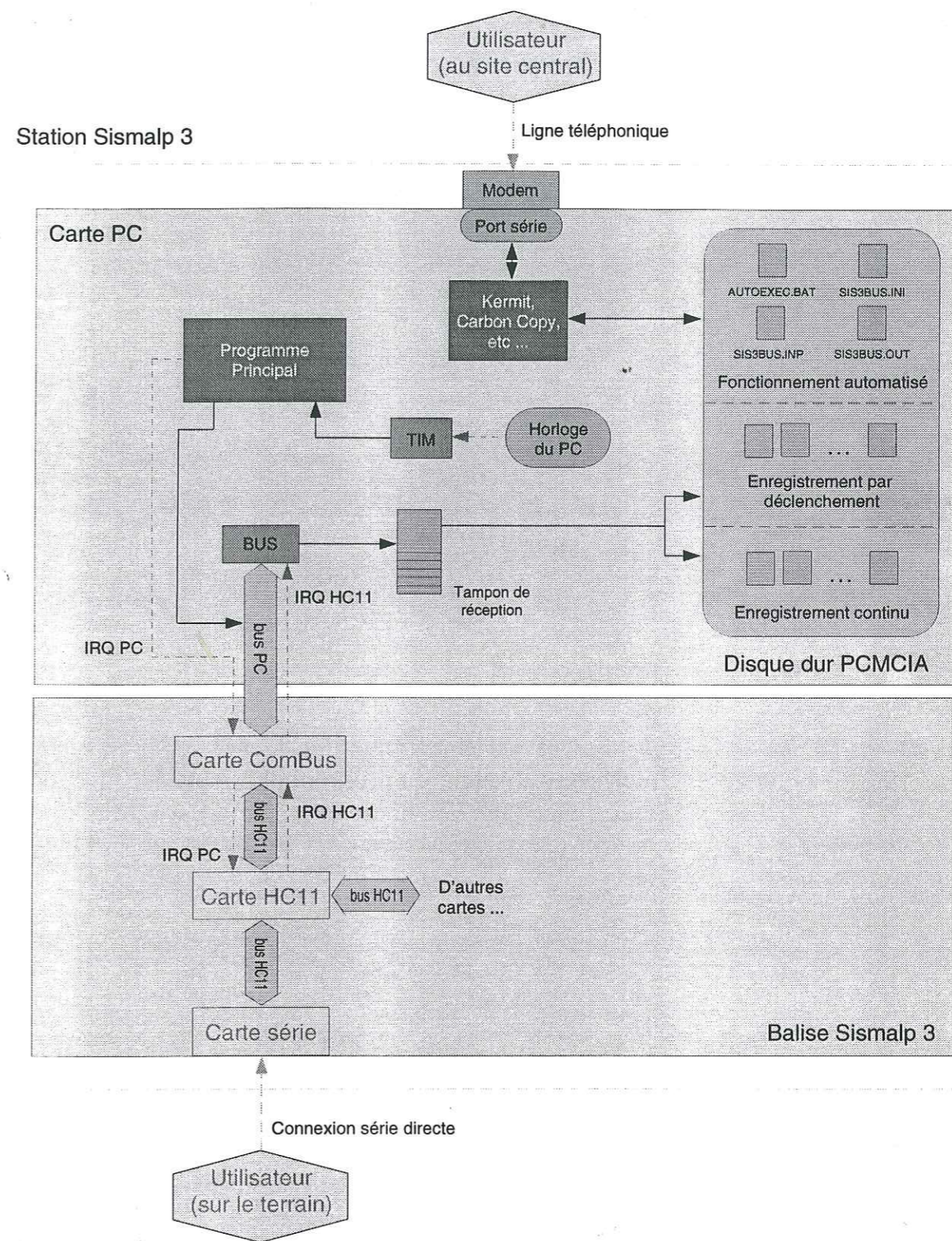


Figure 3.3 -Configuration Sis3Bus.

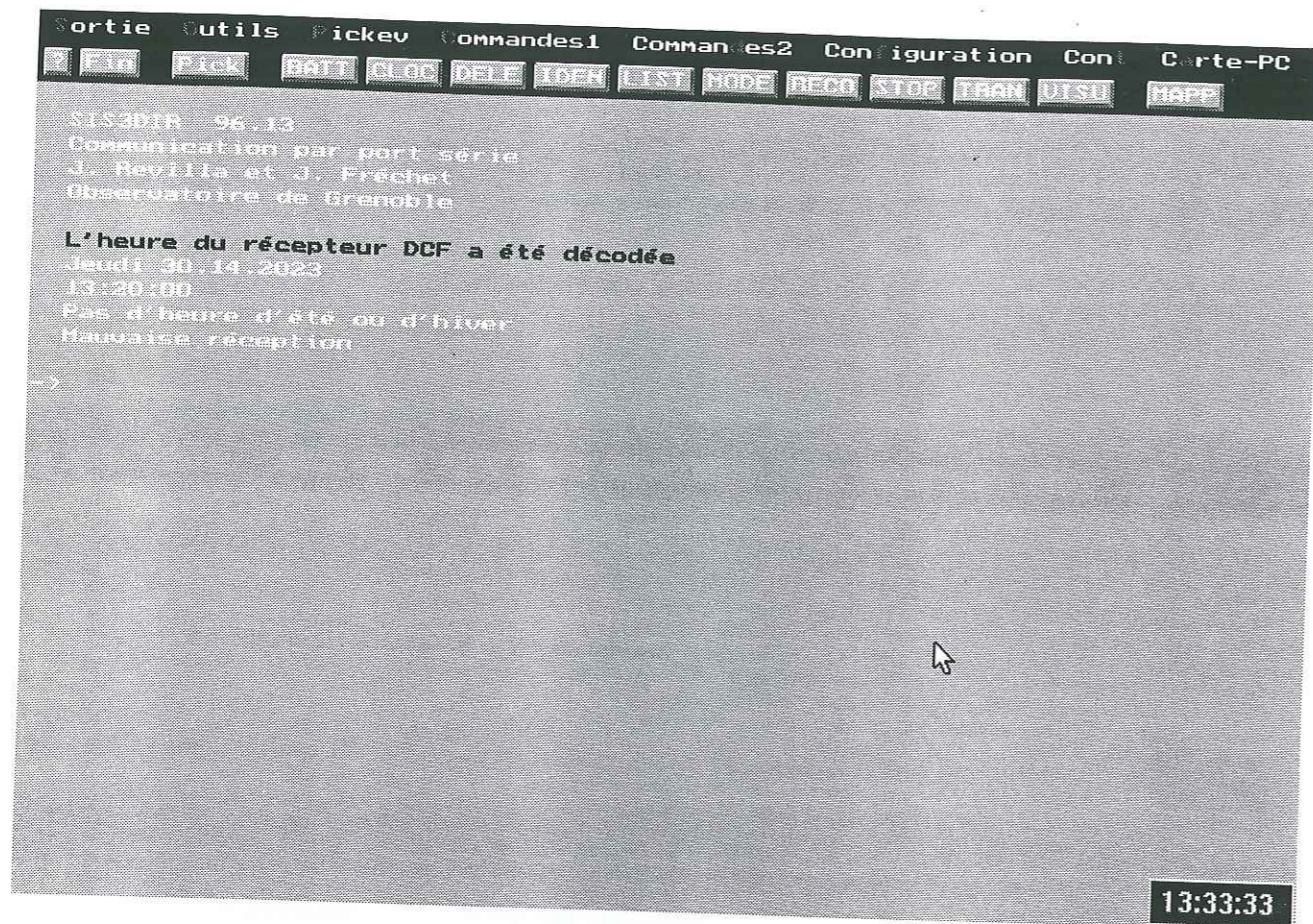


Figure 3.4 - Interface utilisateur du programme Sis3Dir (après décodage de l'heure universelle).

contient un message. Le message décrit l'erreur, lui associant un chiffre d'identification. Quelquefois une suggestion est donnée pour contourner la situation de conflit. Les erreurs de niveau 2 arrêtent l'exécution en cours. Les erreurs de niveau 3, ou erreurs critiques, provoquent l'interruption du programme. Le message est affiché au niveau de l'environnement MS-Dos. Un chiffre est aussi associé à l'erreur.

L'interface utilisateur peut être manipulée avec l'aide d'une souris ou avec le clavier de l'ordinateur. L'utilisation d'une souris n'est pas indispensable, mais simplifie beaucoup le processus. Le curseur de la souris change de forme, en fonction de la région qu'il parcourt. S'il se trouve sur une zone non sensible il aura la forme d'une flèche. S'il se trouve sur une zone sensible, il aura la forme d'une main, qui signale vers la gauche avec le doigt index. Une troisième image est disponible, celle d'un éléphant si le curseur se trouve sur une zone non sensible pendant un processus d'introduction de paramètres. On a utilisé seulement le bouton gauche de la souris.

La figure 3.5 montre la barre de menus déroulants, l'ouverture de l'un des menus et le message d'aide associé à la fonction sélectionnée. Le message que l'on voit affiché dans la fenêtre principal est la réponse de la balise à la commande antérieure (commande IDEN). Le curseur de la souris présente la forme d'une main qui pointe vers la fonction sélectionnée. La figure 3.6 montre le message d'erreur que l'on obtient si on coupe la liaison série et on essaye d'envoyer une commande. Il s'agit d'une erreur de niveau 2.

L'interface utilisateur compte avec un outil assez intéressant pour l'introduction des données. Cet outil s'appelle la boîte d'entrée de données. Il s'agit d'une fenêtre, en couleur bleue, qui contient plusieurs cases pour l'introduction des données. Dans la figure 3.7 on peut apprécier la boîte d'introduction de données qui permet la modification du gain des voies. A l'ouverture de la boîte chaque case contient la valeur par défaut du paramètre. A gauche de la case se trouve le nom du paramètre. A droite, un commentaire entre crochets indique l'intervalle de validité du paramètre. En bas de la boîte, quatre boutons sont disponibles. Le bouton « > » permet d'augmenter la valeur par défaut. Le bouton « < » permet de diminuer la valeur par

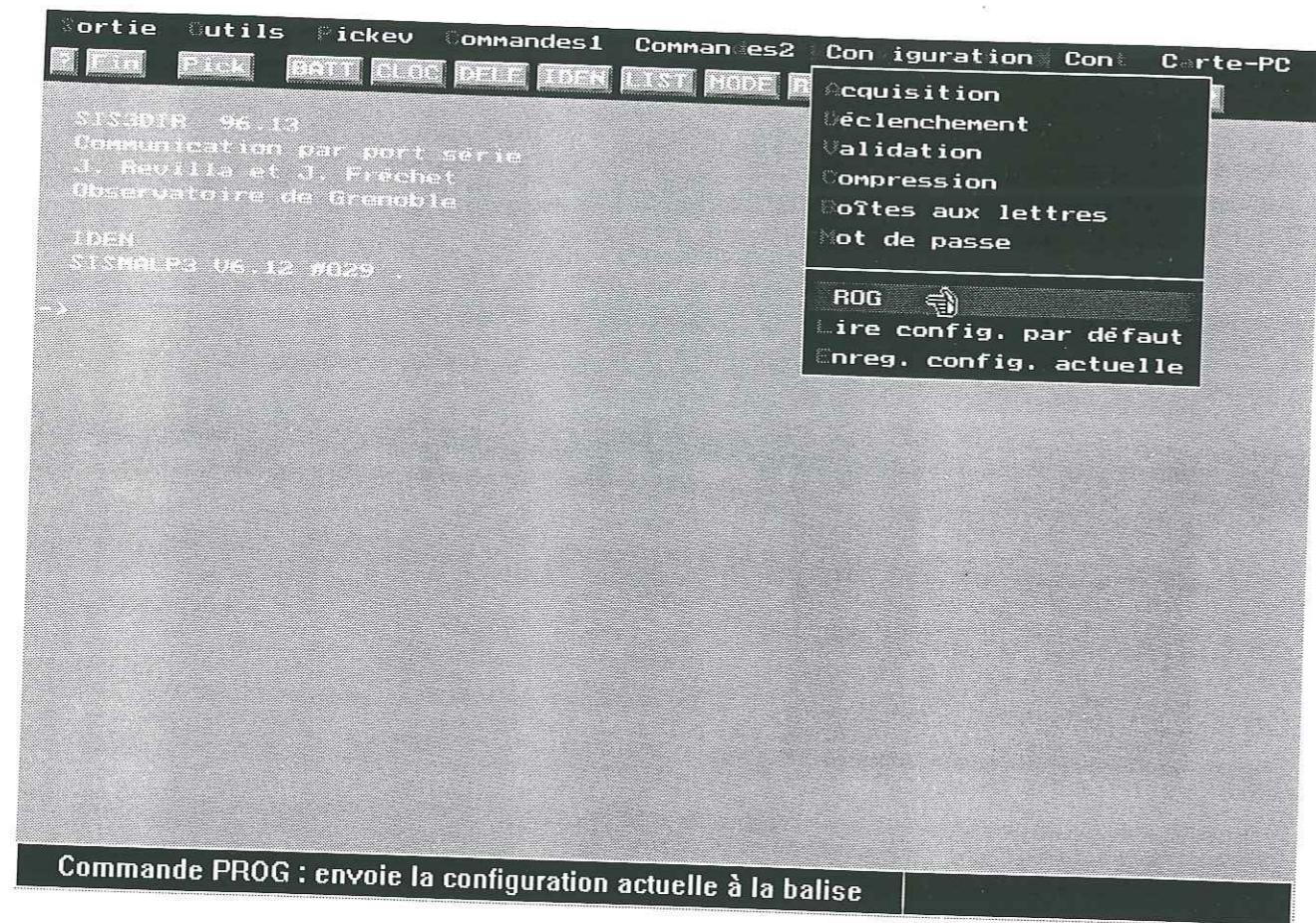


Figure 3.5 - Les différents éléments de l'interface utilisateur.

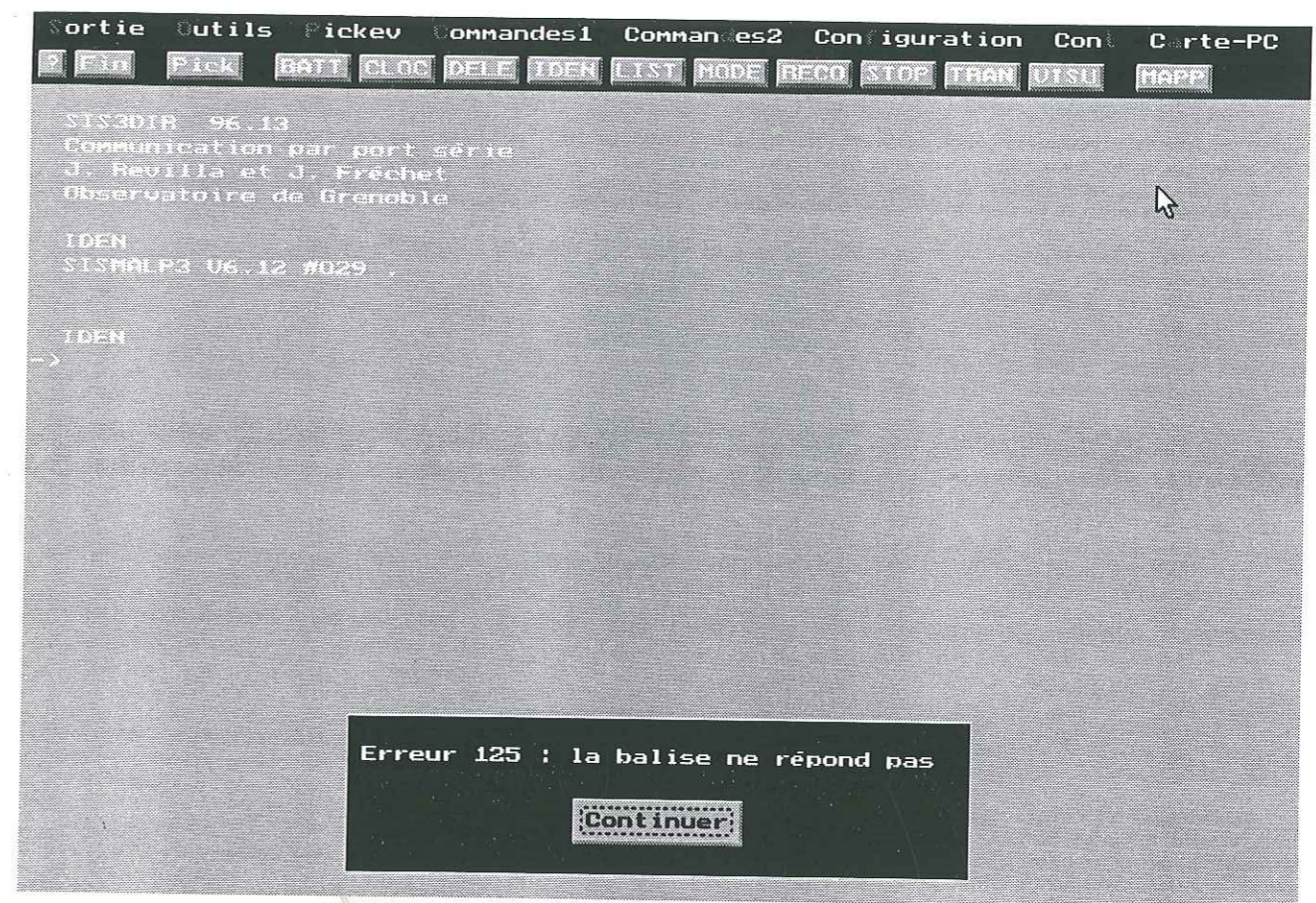


Figure 3.6 - Boîte d'erreur de niveau 2.

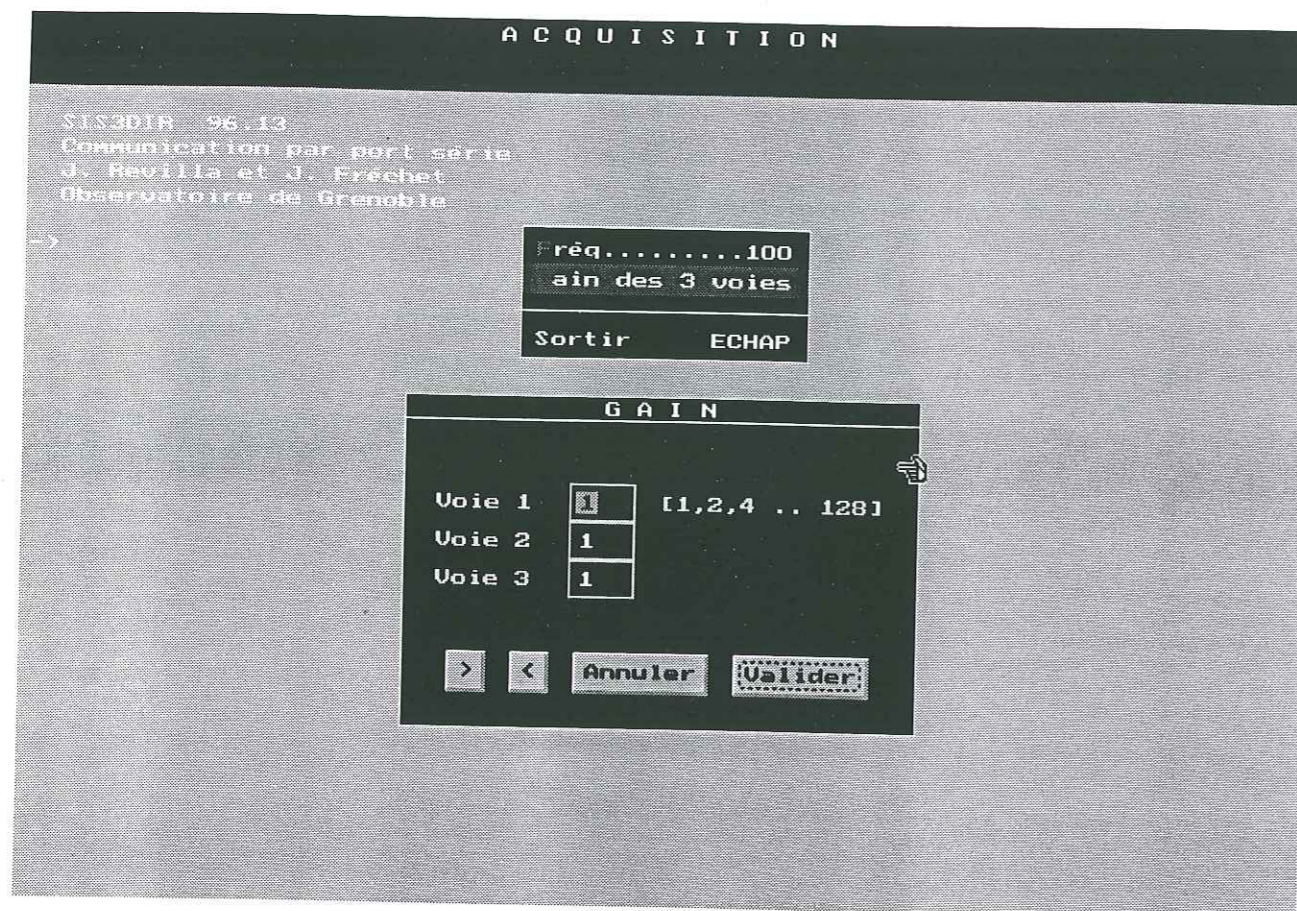


Figure 3.7 - Boîte d'entrée de données.

défaut. Le bouton « Annuler » annule les modifications et le bouton « Valider » les valide. Les boutons peuvent être activés avec la souris ou avec le clavier. Les nouveaux paramètres peuvent être aussi introduits avec le clavier numérique. Finalement, la boîte contient un titre, dans sa partie supérieure, qui décrit le nom du paramètre qui est concerné.

La boîte d'entrée de données fait une validation des paramètres. Plusieurs messages d'erreur sont disponibles pour éviter que l'utilisateur introduise des caractères non valides ou des paramètres en dehors de l'intervalle de validité.

La boîte d'entrée de données est donc un objet qui a été utilisé à plusieurs reprises dans notre programme. Le menu **Configuration**, qui permet la modification des paramètres de la balise, en fait un usage extensif. D'autre part, les boîtes d'entrée de données peuvent être configurées de plusieurs façons pour remplir des fonctions diverses. Les boîtes utilisées par le gestionnaire d'erreurs (erreurs de niveau 2) sont, en fait, des boîtes d'entrée de données simplifiées.

3.3.1 Les menus déroulants du programme Sis3Mod

Les menus déroulants de l'interface utilisateur donnent accès à toutes les fonctions du programme. On présente ci-dessous l'interface du programme Sis3Mod. On décrira ensuite les différences entre celle-ci et les interfaces des programmes Sis3Dir et Sis3Bus.

Les menus déroulants de Sis3Mod sont :

- *Sortie* : informations à propos du programme et sortie.
- *Outils* : utilitaires pour configurer l'interface utilisateur, mise à l'heure de l'horloge Sis3.
- *Pickev* : manipulation de fichiers et visualisation avec le programme Pickev.
- *Commandes 1* : envoi des commandes de dialogue les plus utilisées.
- *Commandes 2* : envoi des commandes de dialogue les moins utilisées.
- *Configuration* : modification de la configuration de la balise Sismalp 3 (commande PROG).

- *Cont* : gestion de l'acquisition continue.
- *Modem* : gestion de la communication téléphonique.

L'ouverture d'un menu déroulant se fait avec l'aide de la souris ou en tapant sa touche raccourci. Une fois le menu ouvert, une fonction peut être sélectionné avec la souris ou avec la barre de sélection (contrôlée avec les flèches du clavier). Une fonction peut être aussi activée avec sa touche raccourci.

Les fonctions peuvent être assignées à deux types de touche raccourci. La touche raccourci directe permet l'exécution de la commande, même si le menu déroulant n'est pas ouvert. La touche raccourci indirecte permet son exécution, si le menu déroulant est déjà ouvert. La touche raccourci directe apparaît à droite de chaque fonction. La touche raccourci indirecte, est l'un des caractères de la fonction. Ce caractère est dessiné en couleur rouge dans les écrans couleurs et en foncé dans les écrans monochromes.

Les fonctions du programme Sis3 peuvent être divisées en quatre catégories. La première concerne les options de configuration de l'interface utilisateur. Ces options sont accompagnées d'une case à cocher, qui indique si elles ont été activées. La deuxième catégorie concerne les routines qui s'occupent du fonctionnement du programme, voire la sortie du programme, l'appel de l'utilitaire Pickev, la mise à l'heure de l'horloge Sis3, etc. La troisième catégorie, regroupe les commandes de dialogue que l'on envoie vers la balise. La quatrième catégorie, enfin, concerne les paramètres de la commande PROG, du menu **Configuration**.

Dans le texte qui suit, on fera une description de chaque menu et de ses fonctions respectives. La catégorie de la fonction est indiquée en fin de ligne.

a). *Sortie*

i. *A propos de ...* *routine*

Cette fonction ouvre une boîte qui donne des informations à propos du programme. Un exemple de cette information est présenté ci-dessous

```
SIS3MOD  96.12
Communication par modem
J. Revilla et J. Fréchet
Observatoire de Grenoble
COM1, IRQ4, UART 16550A
Sismalp3   : version 6.13
```

La première ligne présente le nom et la version du programme. La deuxième, le type de communication. La troisième, le nom des auteurs. La quatrième, leur laboratoire d'accueil. La cinquième ligne indique le port série qui est utilisé pour la communication, la ligne d'interruption qui lui est associée et le type de contrôleur de communications qui a été détecté. La sixième ligne, enfin, indique la version maximale du logiciel de la balise Sismalp 3 qui peut être gérée par cette version de Sis3.

ii. *Fin* *routine*

Cette fonction permet la sortie immédiate du programme.

b). *Outils*

Ce menu contient des utilitaires pour configurer l'interface utilisateur et mettre à l'heure l'horloge Sis3.

i. *Echo des commandes* *option*

Si cette option est activée, le nom de la fonction exécutée est écrit dans la ligne active de la fenêtre principale.

ii. *Mise à l'heure du PC* *routine*

Cette fonction permet la mise à l'heure de l'horloge du programme Sis3. Elle est très utile si un signal horaire, sans codage de temps, est connectée au PC (cf. paragraphe 3.4.4). Dans ce cas, un décodage de l'heure au démarrage du PC est impossible. Grâce à cette option, on peut introduire une heure approximative. La synchronisation avec l'heure universelle se fera à l'arrivée du premier top seconde ou à l'arrivée du premier top minute.

iii. Dernière commande *routine*

Cette fonction permet la réutilisation de la dernière fonction qui a été envoyée.

iv. Touches raccourci *option*

Si cette option est désactivée, un curseur clignotant apparaît dans l'écran principale. On peut alors taper le nom de la fonction désirée.

v. Effacer l'écran *routine*

Cette fonction efface la fenêtre principale.

vi. Fond gris *option*

La modification de cette option change la couleur de la fenêtre principale. La couleur par défaut est le gris clair, les messages étant affichés en blanc. Si on désactive cette option l'écran dévient noir. Cette dernière alternative est la plus intéressante pour les écrans LCD des ordinateurs portables.

vii. Barre d'outils *routine*

Cette fonction permet la configuration de la barre d'outils. Son exécution ouvre des cases à cocher à gauche de toutes les fonctions. Si la boîte est cochée, la fonction sera incluse dans la barre d'outils.

c). Pickev

Ce menu propose des fonctions pour manipuler des fichiers et permet l'appel du programme Pickev.

i. Répertoire *routine*

Cette fonction permet l'exécution de la commande Dir du système d'exploitation MS-Dos. Une boîte d'entrée de données permet l'introduction des paramètres. Le résultat est affiché dans la fenêtre principale.

ii. Pickev *routine*

Cette fonction exécute le programme Pickev. Grâce à cette alternative on peut visualiser et traiter les traces sismiques récupérées sans sortir du programme Sis3.

iii. Décompression *routine*

Cette fonction permet la décompression et la conversion au format Sismalp de tous les fichiers comprimés (*.CMP). Ces deux opérations peuvent aussi être exécutées de façon automatique après la fin d'une communication ou après la récupération d'un événement. Cette alternative peut être activée avec une option du fichier d'initialisation SIS3.INI.

d). Commandes 1

Ce menu permet l'emploi des commandes de dialogue le plus utilisées. La balise envoie toujours une réponse, soit l'information demandée, soit un message de reconnaissance, soit un message d'erreur ou d'avertissement. Toutes ces commandes sont associées à une touche raccourci directe. Si la commande requiert des paramètres, des boîtes de données seront utilisées.

i. BATT *commande*

Cette commande mesure la tension de la batterie de la balise. La mesure est faite avec une résolution de 9.5 microvolts. L'erreur commise est de 0.1 % maximum. Le processus qui se déclenche au niveau de la balise est présenté dans le chapitre 2, paragraphe 2.1.2.

ii. CLOC *commande*

Cette commande demande la date et l'heure de l'horloge de la balise.

iii. DELE commande

Cette commande efface des événements de la mémoire de la balise. On doit introduire comme paramètre le numéro de l'événement que l'on veut effacer. Le paramètre « * » est synonyme de la totalité d'événements. On peut aussi spécifier une liste d'événements en donnant l'origine et la fin, séparées par un tiré (exemple : 2-5).

iv. IDEN commande

Cette commande demande le code d'identification de la balise. Ce code est inscrit par le fabricant dans la mémoire Eprom de la balise et est unique à chaque instrument. Le numéro de la version du logiciel de la balise Sismalp 3 est envoyé aussi.

v. LIST commande

Cette commande demande la liste des événements qui ont été enregistrés par la balise. On doit introduire comme paramètre le numéro d'ordre de l'événement, le symbole « * » ou une liste d'événements. Les informations fournies pour chaque événement sont : son numéro d'ordre, la date et l'heure de l'enregistrement, sa durée en secondes, le facteur d'amplitude de chaque voie, sa taille en octets et le rapport de compression. Le facteur d'amplitude est la valeur maximum STA qui a été calculé pendant l'enregistrement. Le rapport de compression est obtenu à partir de la formule ci-dessous.

$$R = \left(1 - \frac{noc * 8}{ntb} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

noc est le nombre d'octets comprimés. Il s'agit de l'espace qu'occupe l'événement dans la mémoire de la balise. Cette information est envoyée aussi comme réponse à la commande LIST.

ntb est le nombre total de bits sans bruit de numérisation. La conversion sigma-delta introduit un bruit de numérisation dans les bits de poids faible des échantillons. On peut masquer ces bits, car ils ne contiennent pas d'information.

Le problème de la compression est étudié dans le chapitre 2, paragraphe 2.2.3. Le problème du bruit de numérisation est traité dans le même chapitre, paragraphe 2.1.1. La figure 3.8 montre l'écran de l'interface utilisateur après l'envoi d'une commande LIST et d'une commande TRAN (transmission d'événements).

vi. MODE commande

Cette commande demande les paramètres de fonctionnement de la balise. Ces paramètres sont:

- La fréquence d'acquisition.
- Le gain de chaque voie.
- Le type de déclenchement par détection. Deux alternatives sont possibles : le déclenchement par rapport STA/LTA et le déclenchement par dépassement de niveau.
- Détermination de la taille de l'événement. Deux alternatives sont disponibles : taille fixe et détermination de la fin de l'événement avec l'algorithme STA/LTA (taille variable).
- Durée minimum. Si la taille est variable, une durée minimum doit être établie.
- Durée maximum. Idem.
- Durée du pré-événement. Idem.
- Durée du post-événement. Idem.
- Fenêtre de détection. Si plusieurs voies ont été validées pour la détection, ce paramètre indique le temps pendant lequel les voies validées doivent rester en état de déclenchement pour que l'événement soit enregistré.
- Fenêtre de post-détection. Si la taille est variable, ce paramètre indique le temps pendant lequel la condition de fin de l'événement doit exister pour arrêter l'enregistrement.
- Taille de la fenêtre STA.
- Taille de la fenêtre LTA.
- Rapport STA/LTA pour la détection du début de l'événement.
- Rapport STA/LTA pour la détection de la fin de l'événement.
- Voies validées pour l'enregistrement des événements.
- Voies validées pour la détection du début de l'événement.

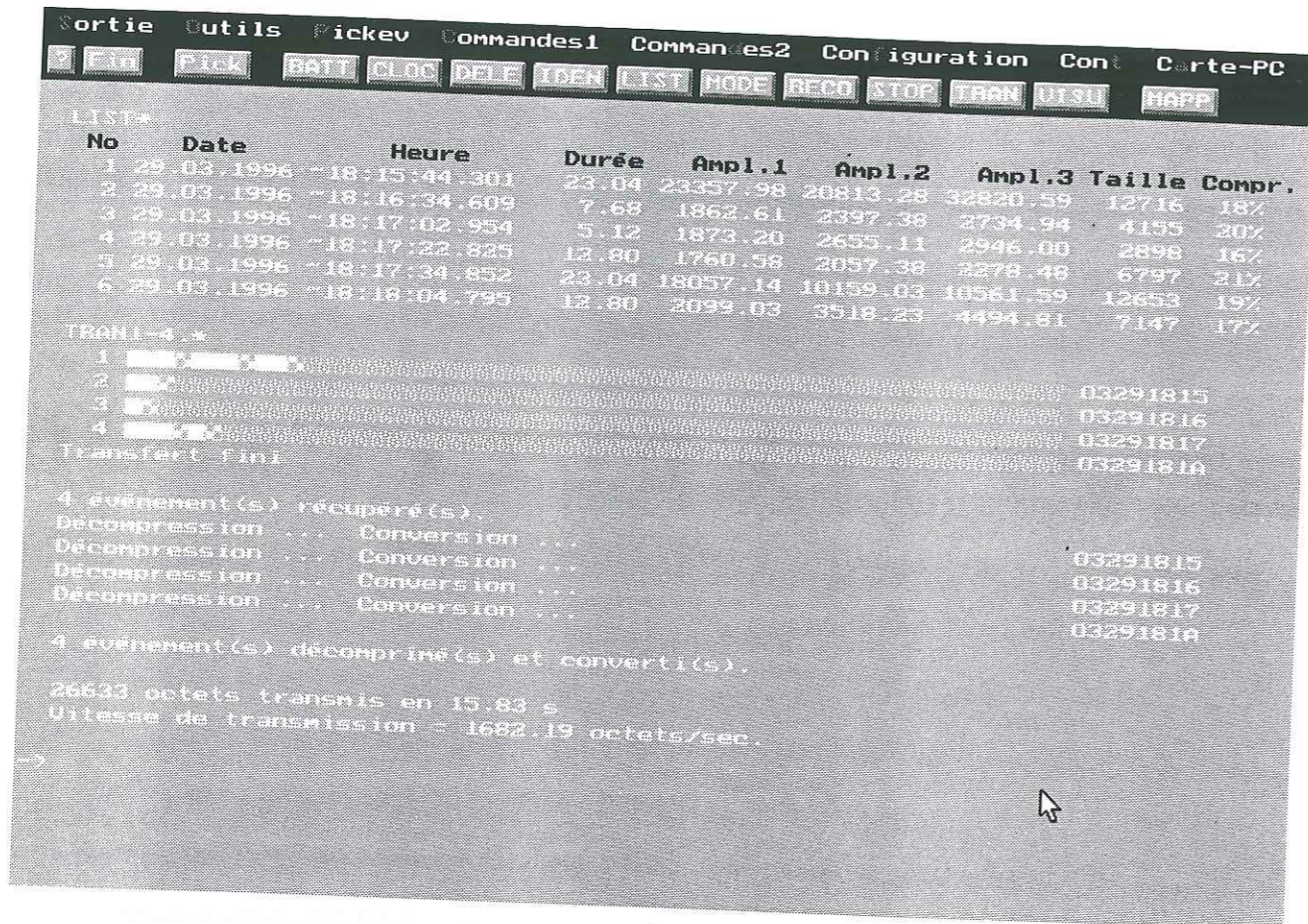


Figure 3.8 - Fenêtre principale après les commandes LIST et TRAN.

- Voies validées pour la détection de la fin de l'événement.
- Taille en échantillons des paquets utilisés pour la compression.
- Validation de l'application d'un masque pour enlever les bits de poids faible des échantillons enregistrés (bruit de numérisation).
- Nombre de boîtes aux lettres validées.
- Fenêtres de détection qui ont été validées.

Ces paramètres peuvent être modifiés avec la commande PROG, qui se trouve dans le menu **Configuration**.

vii. OFST commande

Cette commande demande l'offset des voies en unités de numérisation. La méthode utilisée pour calculer cet offset est décrite dans le chapitre 2, paragraphe 2.2.2.

viii. PASS commande

Cette commande permet le changement du mot de passe utilisé pour restreindre l'accès aux balises.

ix. RECO commande

Cette commande force l'enregistrement d'un événement. Ses paramètres sont introduits avec l'aide d'une boîte d'entrée de données. On peut cocher des cases pour valider des voies. On peut aussi ouvrir une autre boîte d'entrée de données pour introduire la durée de l'enregistrement. La validation de l'enregistrement continu, interdit l'utilisation de la commande RECO.

x. STOP commande

Cette commande permet l'arrêt immédiat d'une transmission de données. Les commandes qui peuvent être interrompues sont la commande TRAN et la commande TEST.

xi. TEMP commande

Cette commande mesure la température à l'intérieur de la balise.

xii. TRAN commande

Cette commande déclenche la transmission des événements enregistrés. Les paramètres sont introduits avec l'aide d'une boîte d'entrée de données. On doit introduire comme paramètre le numéro d'ordre de l'événement, le symbole « * » ou une liste d'événements. On doit aussi signaler si l'on souhaite ou non une décompression et une conversion au format Sismalp, après réception de l'événement. L'option par défaut est déterminée dans le fichier d'initialisation SIS3.INI.

Après la transmission des statistiques sont affichées. Ces chiffres indiquent le nombre d'événements et le nombre d'octets transmis, le temps utilisé pour l'opération et la vitesse de transmission en octets par seconde.

La figure 3.8 montre l'écran de l'interface utilisateur après l'envoi d'une commande LIST et d'une commande TRAN.

xiii. VISU commande

VISU est l'une des commandes les plus intéressantes du système Sismalp 3. Elle permet une visualisation en temps réel de l'acquisition sismique. Son exécution ouvre une fenêtre de visualisation qui est constituée par trois zones : la zone de visualisation, la zone de commande et la zone d'affichage des paramètres. La figure 3.9 présente la fenêtre de visualisation.

La zone de visualisation affiche les signaux enregistrés par les trois voies de la balise. Quatre courbes sont affichées par voie : le signal sismique (en couleur noir), l'offset des voies (en couleur bleu), les valeurs STA (en couleur jaune) et le produit $K \cdot LTA$ (en couleur rouge). K est le rapport de détection STA/LTA qui a été programmé. Quand la courbe jaune croise la courbe rouge, un déclenchement a lieu. Le déclenchement, et donc l'enregistrement d'un événement, est indiqué dans la fenêtre de visualisation par l'épaississement de la courbe des signaux sismiques.

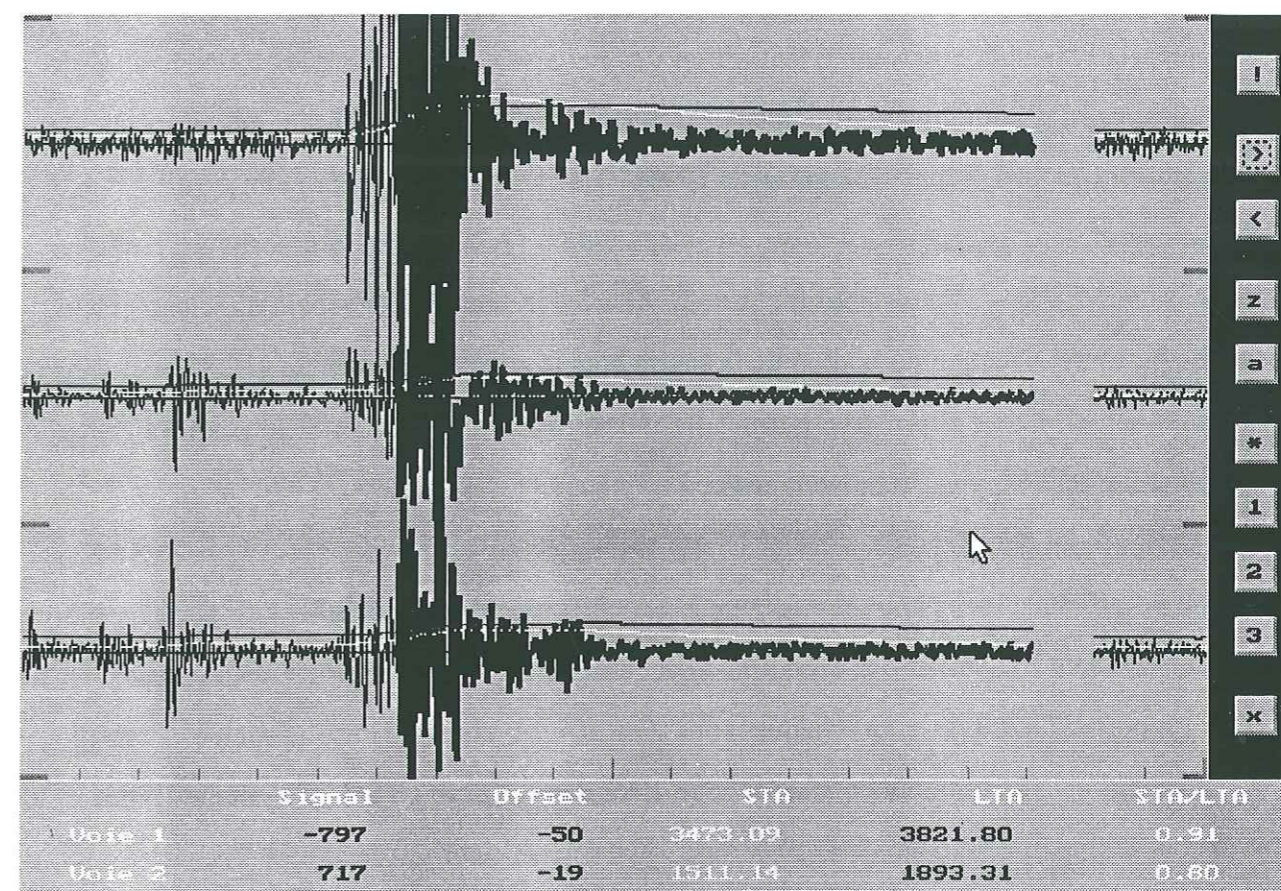


Figure 3.9 - Fenêtre de visualisation (commande VISU).

La zone de commande permet la définition des certaines caractéristiques de la fenêtre de visualisation. Des boutons sont disponibles pour enlever l'offset (!), augmenter l'échelle verticale (>) ou la réduire (<), augmenter l'échelle horizontale (z) ou la réduire (a)², choisir l'affichage de toutes les voies (*) ou d'une seulement (1, 2, 3) ou pour sortir du mode de visualisation (x). Les boutons peuvent être activés avec la souris ou en tapant directement leur touche raccourci. L'appui du bouton de la souris hors la zone de commande gèle l'écran dans son état actuel. Cette alternative permet l'observation des phénomènes qui pourraient se présenter. Le relâchement du bouton relance l'affichage.

La zone d'affichage des paramètres contient des chiffres qui sont actualisés en permanence. Ces chiffres sont : la valeur des échantillons acquises, l'offset, la valeur STA, la valeur LTA et le rapport STA/LTA, pour chaque voie. On affiche aussi l'heure associée à chaque échantillon, l'échelle horizontale en secondes, l'échelle verticale en unités de numérisation et en bits et le taux d'affichage des échantillons. Ce dernier peut atteindre une vitesse de 100 échantillons par seconde.

La commande VISU est très utile pour déterminer le bon fonctionnement de la station et les caractéristiques du bruit sismique pendant une opération sur le terrain.

e). Commandes 2

Ce menu permet l'envoi des commandes de dialogue le moins utilisées. Toutes ces commandes sont associées à des touches raccourci indirectes.

i. RSET commande

Cette commande provoque une remise à zéro logicielle de la balise. Un interrupteur sur la carte microprocesseur de la balise détermine si cette opération inclut un effacement des événements enregistrés en mémoire vive.

² z = zoom, a = antizoom.

ii. TEST commande

Cette commande déclenche la transmission d'un fichier « test ». Une vérification est faite après réception. Si le fichier transmis n'est pas identique au fichier patron du programme Sis3, un message d'erreur est affiché. Cette commande a été très utile pendant le développement du programme pour déterminer la source de certaines erreurs de transmission.

iii. SYNC commande

Cette commande permet la mesure du délai de ligne et du décalage entre les horloges de la balise et de l'ordinateur PC. Elle est valide quand le PC est connecté à une base de temps extérieure, synchronisée à l'heure universelle. Après exécution, l'heure et la date de la balise et du PC, le décalage et le délai de ligne sont affichés.

iv. CLOC= commande

Cette commande permet la modification de la date et de l'heure de l'horloge de la balise. Une boîte d'entrée de données permet l'introduction des nouveaux paramètres. Avant l'ouverture de cette boîte, la commande CLOC est envoyée pour récupérer les valeurs actuelles.

v. CLOC- commande

Cette commande permet le retranchement de quelques secondes à l'horloge de balise. Une boîte d'entrée de données permet l'introduction du nombre de secondes qui seront enlevées.

vi. CLOC+ commande

Cette commande permet l'ajout de quelques secondes à l'horloge de la balise. Une boîte d'entrée de données permet l'introduction du nombre de secondes qui seront ajoutées.

vii. CLOC! commande

Cette commande permet la mise à l'heure de l'horloge du PC en prenant comme référence l'heure de la balise.

viii. WAKE commande

Cette commande permet la programmation du réveil périodique de la carte PC de la balise.

ix. WAOF commande

Cette commande permet l'annulation du réveil périodique de la carte PC.

x. CAL1 commande

Cette commande déclenche une calibration du système avec un échelon de courant comme signal de calibration. La durée de l'échelon est introduite comme paramètre.

xi. CAL2 commande

Cette commande déclenche une calibration du système avec un courant binaire pseudo-aléatoire comme signal de calibration. Les paramètres de ce signal peuvent être contrôlés avec l'aide d'une boîte d'entrée de données. Ces paramètres sont : le germe du signal, la valeur X et la durée du signal. La répétition périodique de cette opération peut aussi être programmée. La calibration de la station Sismalp 3 et la définition de tous ces paramètres sont présentées dans le chapitre 5.

xii. CAOF commande

Cette commande permet l'annulation d'une opération de calibration périodique.

xiii. SKED commande

Cette commande obtient des informations relatives aux opérations périodiques programmables : le réveil du PC et les opérations de calibration. Le nom de la commande est une abréviation mnémonique du mot anglais « schedule ». En français, ce mot peut être traduit comme liste d'horaires ou liste de tâches programmées.

xiv. RBOX commande

Cette commande permet la lecture d'une boîte aux lettres. Une boîte d'entrée de données est utilisée pour introduire le numéro de la boîte aux lettres.

xv. WBOX commande

Cette commande permet l'écriture d'une boîte aux lettres. Une boîte d'entrée de données est utilisée pour introduire le numéro de la boîte aux lettres. Une autre permet l'introduction du texte.

xvi. CBOX commande

Cette commande permet effacement d'une boîte aux lettres. Une boîte d'entrée de données est utilisée pour introduire le numéro de la boîte aux lettres.

Les boîtes aux lettres donnent une grande flexibilité à la balise Sismalp 3-PC. Leurs applications dans cette configuration sont discutées dans le chapitre 4.

f). Configuration

Ce menu permet la modification de tous les paramètres de fonctionnement de la balise. Cette tâche est accomplie par la commande PROG. Les six premières fonctions permettent l'introduction des paramètres. Le septième envoie la commande. Les deux dernières, permettent la lecture et la modification d'un fichier de paramètres.

L'ouverture du menu **Configuration** provoque l'envoi automatique de la commande MODE. Ceci veut dire que tous les paramètres par défaut, que l'on trouvera dans les boîtes d'entrée des données, sont les paramètres actuels de la balise.

i. Acquisition paramètre

Cette fonction ouvre une boîte d'entrée de données qui permet la modification de la fréquence d'acquisition et du gain des trois voies.

ii. Déclenchement paramètre

Cette fonction ouvre une boîte d'entrée de données qui permet la sélection du type de déclenchement désiré pour l'enregistrement des événements. Trois types de déclenchements sont disponibles : déclenchement par rapport STA/LTA, déclenchement par dépassement d'un

seuil fixe et déclenchement par programmation de fenêtres. Les deux premiers s'excluent mutuellement.

Si le premier est sélectionné, une nouvelle boîte d'entrée de données est ouverte. Celle-ci permet la modification de la taille des fenêtres STA et LTA, ainsi que le seuil de début et de fin de l'événement, pour chaque voie. Deux options permettent le choix de l'enregistrement avec une taille fixe ou avec une taille variable. La première ouvre une boîte qui permet l'introduction de la taille du pré-événement et de la durée de l'événement. La deuxième option ouvre une boîte qui permet l'introduction de la durée du pré-événement, du post-événement, la durée minimum et maximum de l'événement, la fenêtre de détection et la fenêtre de post-détection.

Si le déclenchement par seuil fixe est choisi, une boîte d'entrée de données est ouverte pour permettre l'introduction du seuil pour chaque voie et la taille des événements. Le seuil est donné en unités de numérisation. La taille des événements est déterminée par la durée du pré-événement et de l'événement. Le concept de taille variable n'existe pas pour ce type de déclenchement.

Si le déclenchement par fenêtre programmée en avance est choisi, une boîte d'entrée de données s'ouvre pour donner accès à huit fenêtres indépendantes. Chaque fenêtre donne accès à une nouvelle boîte d'entrée de données. Les paramètres des fenêtres sont : la date et l'heure du déclenchement, la durée en secondes de l'enregistrement et une option pour activer ou désactiver la fenêtre. L'utilisation des fenêtres d'enregistrement est intéressante pour l'étude du bruit sismique à des différents moments de la journée ou pour l'enregistrement de séismes artificiels (tirs de carrière ou explosions nucléaires).

iii. *Validation* *paramètre*

Cette fonction permet le choix des voies qui participent dans l'acquisition, la détection du début ou la détection de la fin de l'événement. Les voies sont sélectionnées avec l'aide de cases à cocher. Si plusieurs voies sont validées pour la détection, celle-ci sera prise en

considération si les voies choisies déclenchent simultanément. Il s'agit donc d'une condition de validation du type « et », plutôt que « ou ».

iv. *Compression* *paramètre*

Cette fonction ouvre une boîte d'entrée de données qui permet la validation du masque et la détermination de la taille des paquets pour la compression. Ce masque enlève les bits de poids faible qui sont corrompus par le bruit électronique de numérisation. Le nombre de bits bruités est une fonction de la fréquence d'acquisition et du gain des voies. Ceci est traité avec détail dans le chapitre 2, paragraphe 2.1.2.

v. *Boîtes aux lettres* *paramètre*

Cette fonction ouvre une boîte d'entrée de données qui permet la détermination du nombre de boîtes aux lettres désirées. L'espace mémoire occupé par la totalité des boîtes aux lettres est fixe et égal à 1024 octets. Leur taille est donc inversement proportionnelle à leur nombre.

vi. *Mot de passe* *paramètre*

Cette fonction ouvre une boîte d'entrée de données qui permet le changement du mot de passe qui restreint l'accès aux balises.

vii. *Continu* *paramètre*

Cette fonction permet la modification des paramètres qui concernent l'enregistrement continu. Ces paramètres sont : le pourcentage de la mémoire de la balise qui est allouée à ce mode d'enregistrement et la taille des unités minimum de stockage (en secondes), ainsi que les seuils de remplissage qui déclenchent le réveil du PC (voir le chapitre 4).

viii. *PROG* *commande*

Cette fonction envoie la commande PROG avec les nouveaux paramètres que l'on a pu introduire grâce aux fonctions précédentes.

ix. *Lire la configuration par défaut* *routine*

Cette fonction lit le fichier SIS3.PRG qui contient une liste de paramètres. Ces nouveaux paramètres remplaceront les valeurs par défaut des fonctions précédentes.

x. Enregistrer configuration actuelle *routine*

Cette fonction permet l'enregistrement de la configuration actuelle et donc la modification du fichier SIS3.PRG.

g). Cont

L'enregistrement continu peut coexister avec l'enregistrement par déclenchement. L'utilisateur doit partager la mémoire en spécifiant le pourcentage alloué à l'enregistrement continu. Ce mode d'enregistrement utilise des unités minimum de stockage. Ces unités sont des fichiers indépendants. Leur taille, en secondes, doit être définie par l'utilisateur.

i. MAPP *commande*

La fonction MAPP donne des informations concernant l'espace mémoire occupé par chaque mode d'enregistrement. Les unités utilisées pour le partage de la mémoire sont les blocs de mémoire. Chaque bloc est égal à 2048 octets.

Pour le mode déclenchement les informations affichées sont :

- le nombre de séismes enregistrés,
- le nombre de blocs occupés,
- le nombre de blocs alloués.

Pour le mode d'enregistrement continu les informations affichées sont :

- le nombre de blocs occupés,
- le nombre de blocs alloués,
- le nombre de blocs du seuil pour le réveil du PC,
- l'heure et la date du début de l'enregistrement,
- l'heure et la date de la fin de l'enregistrement,
- enregistrement continu en cours ou non.

ii. BCTN *commande*

Cette fonction démarre le processus d'enregistrement continu.

iii. SCTN *commande*

Cette fonction arrête le processus d'enregistrement continu.

iv. LCTN *commande*

Cette fonction demande une liste de fichiers d'enregistrement continu. L'utilisateur doit introduire comme paramètre le numéro d'ordre du fichier, le paramètre « * » ou une liste de fichiers consécutifs.

v. TCTN *commande*

Cette fonction demande la transmission des fichiers d'enregistrement continu. L'utilisateur doit introduire comme paramètre le numéro d'ordre du fichier, le paramètre « * » ou une liste de fichiers consécutifs.

vi. DCTN *commande*

Cette fonction demande l'effacement des fichiers d'enregistrement continu. L'utilisateur doit introduire comme paramètre le numéro d'ordre du fichier, le paramètre « * » ou une liste de fichiers consécutifs.

h). Modem

Ce menu permet la gestion d'un appel téléphonique manuel.

i. CALL *commande*

Cette fonction établit la communication téléphonique. Le numéro par défaut et le préfixe, sont écrits dans le fichier d'initialisation SIS3.INI.

ii. HANG *commande*

Cette fonction coupe la communication téléphonique. Il s'agit d'une mesure d'urgence pour forcer une coupure de la communication, dans le cas d'un blocage de la balise.

iii. EXIT commande

Cette fonction permet la déconnexion de l'alimentation du modem ou du PC. La coupure de la communication est faite par la balise, à demande de l'utilisateur. Il s'agit de la procédure standard de fin de communication.

3.3.2 Les menus déroulants des programmes Sis3Dir et Sis3Bus

La barre de menus des programmes Sis3Dir et Sis3Bus ne contient pas le menu **Modem**. Le menu **Carte-PC** se trouve à sa place.

a) Carte-PC

Ce menu permet la gestion de la carte PC de la balise.

i. PCON commande

Cette fonction connecte l'alimentation de la carte PC (Sis3Dir seulement).

ii. EXIT commande

Cette fonction déconnecte l'alimentation de la carte PC.

3.4 Le programme principal

Le programme principal est constitué de trois parties indépendantes qui sont exécutées de façon successive. La première est l'initialisation du programme, la deuxième est la boucle principale et la troisième est la conclusion du programme.

3.4.1 Initialisation du programme

Cette partie est une suite de routines qui initialisent plusieurs niveaux du programme Sis3. Le processus d'initialisation est présenté ci-dessous.

- a). Vérification de l'existence d'une souris. Si elle est présente, plusieurs variables sont initialisées.
- b). Vérification du mode graphique actuellement installé par le système d'exploitation MS-Dos.
- c). Récupération de la ligne de commandes. La ligne de commandes est une chaîne qui peut accompagner le nom du programme au moment de son invocation. Elle permet de configurer son fonctionnement en lui passant des options accompagnées de leurs paramètres. Les options actuellement disponibles sont :

- i. /C(commandes de dialogue). Cette option permet de rajouter une chaîne qui contient des commandes de dialogue qui seront exécutées au démarrage du programme. Les commandes de dialogue sont représentées par des touches raccourci, accompagnées par leurs paramètres et séparées par des points virgule.

- ii. /D. Cette option active le mode débogage. Ce mode d'opération affiche plus d'informations à l'écran pendant l'exécution du programme. Un autre aspect de ce mode d'opération est le fichier de débogage SIS3.SPY. Ce fichier contiendra, à la sortie du programme, les octets qui ont été échangés entre le programme Sis3 et la balise, pendant une communication série. Ces octets ne sont pas écrits dans le fichier pendant la communication, ceci ralentirait de façon inutile le processus. Ils sont écrits dans un tampon tournant, qui a une taille égale à tout l'espace mémoire disponible dans le PC. Le tampon est vidé dans le fichier SIS3.SPY à la sortie du programme.

- iii. /M. Cette option permet une exécution du programme en mode monochrome.
- iv. /Pdriv[mode]. Cette option permet de spécifier un pilote graphique. Les options disponibles sont : CGA, EGA, VGA, VESA et Hercules Monochrome.
- v. /R[fichier]. Cette option active la lecture du fichier d'entrée de commandes [fichier].INP. Ce fichier contient des commandes qui seront exécutées de façon automatique au démarrage du programme. Le nom du fichier par défaut est SIS3.INP.
- vi. /S[fichier]. Cette option active l'appel automatique des stations. La liste de stations et leur numéro téléphonique se trouvent dans le fichier [fichier].STN. Le fichier par défaut est SIS3.STN.
- vii. /?. Cette option permet l'affichage d'un message d'aide décrivant toutes les options mentionnées ci-dessus.
- d). Lecture du fichier langue SIS31.LNG. Ce fichier contient tous les messages qui sont affichés pendant le fonctionnement du programme Sis3. Le fichier SIS31.LNG est écrit dans la langue qui sera utilisée par défaut. D'autres fichiers langue peuvent être inclus (SIS3n.LNG, où $n = 1, 2, 3 \dots$). Les messages sont assignés à des variables dynamiques. La taille occupée en mémoire par les messages est donc déterminée pendant l'initialisation.
- e). Initialisation de plusieurs variables du programme, lecture du fichier SIS3.PRG et lecture du fichier SIS3.INI. Le fichier SIS3.PRG contient les valeurs initiales des paramètres de la balise qui seront prises en compte par la commande PROG (cf. paragraphe 3.2). Le fichier SIS3.INI contient certains paramètres qui définissent le fonctionnement du programme Sis3. Ceci permet à l'utilisateur d'adapter le programme à ses propres besoins.

- f). Installation des procédures d'interruption et installation de la procédure de sortie. Les procédures d'interruption Tim, Com, Bus et Cloc sont installées sur leurs vecteurs d'interruption correspondants. L'installation de la procédure de sortie consiste à l'assignation de la procédure de conclusion (la troisième partie du programme) à une adresse particulière. Cette assignation permettra l'exécution de la routine de conclusion à la fin du programme, même si la fin a été forcée par une situation d'erreur ou par une interruption brusque. Ceci assure la remise en état de l'ordinateur après son utilisation par le programme Sis3.
- g). Initialisation matérielle de l'ordinateur. On initialise le contrôleur d'interruptions PIC 8259 pour valider les interruptions que l'on utilisera et pour masquer celles que l'on n'utilisera pas. Le contrôleur de communications 8250 est aussi initialisé avec les paramètres qui caractériseront la communication par liaison série avec la balise. Dans la version Sis3Bus, les variables qui contrôlent le fonctionnement de la carte ComBus sont aussi initialisées.
- h). Initialisation du dispositif de sortie du programme. Deux sorties sont possibles, une sortie sur écran, graphique ou texte, et une sortie sur fichier. Le type de sortie écran et l'option de sortie sur fichier sont définis dans le fichier d'initialisation SIS3.INI. Si une sortie sur écran a été définie, l'interface utilisateur graphique ou l'interface utilisateur texte sont initialisées. Si une sortie sur fichier a été définie le fichier SIS3.OUT est ouvert. Cette dernière option annule la sortie sur écran.

Le fichier de débogage SIS3.SPY et le fichier de sortie SIS3.OUT ont des fonctions différentes. Dans le premier cas, on écrit les octets échangés pendant une communication série. Dans le deuxième cas, on écrit l'interprétation que la balise fait de ces octets. Dans le premier on a les données crues, dans le deuxième on a les messages qui auraient été envoyés vers l'interface utilisateur texte.

i). Ouverture du fichier journal de bord SIS3.LOG. Ce fichier contient des informations concernant le dialogue entre le PC et la balise. Il ne contient pas les données crues (SIS3.SPY), ni la sortie sur fichier (SIS3.OUT), mais plutôt une interprétation de cette dernière. Cette option n'annule pas la sortie sur écran.

j). Décodage de l'heure. Le décodage sera fait si une horloge avec une sortie Télécode est connectée au port parallèle de l'ordinateur et si l'option a été validée dans le fichier SIS3.INI. Le processus consiste à attendre le premier top minute et à décoder ensuite la trame minute qui suit. On obtient ainsi l'heure et la date universelles qui seront utilisées pour mettre à l'heure l'horloge du programme Sis3. La précision de l'heure est assurée par les tops secondes qui suivent.

3.4.2 Boucle principale

La boucle principale est le coeur du programme principal. Elle est constituée par des processus préliminaires et par une boucle qui s'arrête pour attendre l'entrée d'un caractère ou d'un signal souris. Le déroulement des actions est présenté ci-dessous.

a). Appel automatique des stations. Si cette option a été validée les stations qui se trouvent dans le fichier SIS3.STN sont appelées.

b). Lecture et exécution de la ligne de commandes si l'option a été validée.

c). Lecture et exécution du fichier de commandes SIS3.INP si l'option a été validée.

d). Lecture de la touche ou de la souris. Le flux du programme s'arrête ici pour attendre une initiative de la part de l'utilisateur. Cette partie est ignorée si l'un des processus ci-dessus est encore en cours.

e). Gestion de l'interface utilisateur. Le message envoyé par l'utilisateur provoque certains changements au niveau de l'interface utilisateur. Ces changements provoquent l'ouverture de fenêtres ou des boîtes d'entrée des données pour permettre une meilleure saisie des commandes et de leurs paramètres.

f). Interprétation de l'entrée. L'interaction avec l'interface utilisateur permet à l'utilisateur de construire une chaîne qui contient la commande désirée et ses paramètres. Cette chaîne est ici interprétée pour déterminer les décisions à suivre. S'il s'agit d'une commande de dialogue, elle est envoyée vers la balise. Le comportement du programme est différent en fonction du type de commande dialogue. Deux cas sont possibles.

i. S'il s'agit d'une commande longue (LIST, TRAN ou TEST), la boucle est reprise après l'envoi de la commande. La réponse de la balise est traitée par le gestionnaire de processus Tim. Quand la réception de la réponse, qui peut durer plusieurs minutes, arrive à sa fin, la boucle principale reçoit un message de la procédure Tim lui indiquant que le processus est fini.

ii. S'il s'agit d'une commande courte (toutes les autres commandes), le flux du programme s'arrête afin d'attendre la réponse de la balise. Dans ce cas, la réponse est traitée par la boucle principale et non par la procédure Tim.

Dans les deux cas cités ci-dessus, un dispositif de protection affiche un message d'erreur si un certain temps s'écoule sans que la balise envoie une réponse. Ce dispositif évite le blocage du programme Sis3 dans ce genre de situations. Le dispositif de protection est activé par la procédure d'interruption Tim.

Si l'option de débogage est activée, les octets envoyés vers la balise sont écrits dans le tampon tournant de débogage.

3.4.3 Conclusion du programme

La procédure de sortie est une routine qui s'occupe de la conclusion du programme. Elle est exécutée à la fin du programme, même s'il a été arrêté à cause d'une situation d'erreur. Cette partie du programme est constituée par les routines qui suivent.

- a). Fermeture du matériel. Le contrôleur d'interruption PIC 8259 et le contrôleur de communication sont reprogrammés avec leurs anciens paramètres.
- b). Fermeture des interruptions. Les vecteurs d'interruption sont remis à leurs anciennes valeurs.
- c). Fermeture de l'interface utilisateur.
- d). Fermeture du fichier de sortie SIS3.OUT.
- e). Fermeture du fichier journal de bord SIS3.LOG.
- e). Fermeture du fichier d'entrée de commandes SIS3.INP.
- f). Création du fichier de débogage SIS3.SPY. Le tampon tournant qui contient les octets qui ont été échangé entre le PC et la balise est maintenant vidé dans ce fichier. Le fichier est ensuite fermé.

3.5 Les procédures d'interruption

Quatre procédures d'interruption sont disponibles pour gérer des processus de bas niveau. Ces procédures libèrent le programme principal qui peut alors s'occuper avec des tâches de plus haut niveau.

3.5.1 Le gestionnaire de processus - Tim

Cette procédure est installée sur l'interruption matérielle \$08³ du PC. Cette interruption est déclenchée par le compteur programmable 8254 18.2 fois par seconde (ce circuit intégré et son rôle dans la gestion de l'horloge standard du PC sont présentés dans le paragraphe 3.5.3). Les processus exécutés par Tim sont décrits ci-dessous.

- a). Exécution de l'ancienne procédure d'interruption qui était installée sur l'interruption \$08 avant l'exécution du programme Sis3. Cette procédure a comme fonction la gestion de l'horloge standard du PC ainsi que la gestion des accès au disque dur.
- b). Gestion de compteurs. Quatre compteurs sont utilisés pour contrôler des processus du programme Sis3.
 - i. Un de ces compteurs est utilisé pour déterminer le temps maximum d'attente d'une réponse après l'envoi d'une commande. Ce compteur est le coeur du dispositif de protection qui évite que le programme Sis3 reste bloqué, si la balise ne répond pas.
 - ii. Un autre compteur détermine la durée du message sonore activé par la procédure Com chaque fois qu'une erreur de communication a lieu.
 - iii. Les autres deux compteurs, enfin, gèrent le comportement de deux outils graphiques de l'interface utilisateur. Ces outils sont le curseur clignotant associé à la saisie de données et un dispositif graphique associé à la transmission de données pendant l'exécution d'une commande TEST ou TRAN.

³ Le symbole « \$ » est utilisé pour indiquer une notation hexadécimale.

c). Décodage de la seconde. Si un récepteur de temps est connecté et si le décodage de la trame minute initiale est en cours. Le gestionnaire Tim détermine la valeur binaire de la seconde qui vient d'arriver. Si le top dure 0.25 secondes, il s'agit d'un « 1 ». S'il dure 0.5 secondes, il s'agit d'un « 0 ». Le gestionnaire Tim détermine aussi la fin de la trame minute et donc la fin du processus de décodage.

d). Traitement de la réponse après l'envoi d'une commande longue (LIST, TRAN ou TEST). Le programme Sis3 dispose d'un tampon de réception de 5000 octets. La procédure d'interruption Com (transmission série) et Bus (transmission bus PC) écrivent les octets reçus dans ce tampon. Quand le tampon est plein, ou quand la transmission est finie, un message est envoyé à Tim (s'il s'agit d'une commande longue) en modifiant une variable jeton. Si ce jeton est activé la procédure Tim vide le contenu du tampon sur disque dur. S'il s'agit de la fin de la transmission, Tim modifie une variable pour passer le message au programme principal.

3.5.2 Le gestionnaire de communication série - Com

On peut installer le gestionnaire de communication Com, sur l'interruption matérielle \$0C ou sur l'interruption matérielle \$0B. Dans le premier cas on utilisera le port série 1 ou 3, dans le deuxième cas on utilisera le port série 2 ou 4. Ces options sont définies dans le fichier d'initialisation SIS3.INI. L'interruption est déclenchée dans trois cas possibles : la réception d'un octet, la génération d'une erreur de communication et le changement de l'une des lignes de contrôle du port série.

a). Réception d'un octet. On lit l'octet et on le place dans le tampon principal. Si Tim est en train de vider le tampon principal, on place l'octet reçu dans l'un des tampons auxiliaires. On vérifie ensuite l'espace libre dans le tampon principal. S'il est plein on modifie la variable jeton pour autoriser le vidage.

On autorise aussi un vidage si l'octet reçu indique la fin de la transmission. Ceci est indiqué par la séquence CR+LF (\$13+\$10). Cette séquence pourrait se présenter de façon accidentelle lors d'une transmission de données. On a adopté une convention au niveau du protocole de communication pour éviter cette ambiguïté. Chaque fois que l'octet CR est émis comme faisant partie des données transmises il sera répété. S'il fait partie de la séquence de fin de paquet il sera envoyé une seule fois. La procédure d'interruption Com prend en charge cette correction. Cette convention est suivie aussi par la procédure du programme principal qui envoie des commandes vers la balise.

Si l'option de débogage a été activée on écrit l'octet reçu dans le tampon tournant de débogage.

b). Génération d'une erreur de communication. La procédure Com procède alors à la lecture du registre qui indique la nature de l'erreur. Elle active un message sonore pour prévenir l'utilisateur. La durée du message est réglée par un compteur incrémenté par la procédure Tim. Si l'option de débogage a été activée on écrit le code de l'erreur dans le tampon tournant de débogage.

c). Changement d'une ligne de contrôle du port série. Dans ce cas, Com lit le registre du contrôleur qui annonce cette situation pour le remettre à zéro. Aucune mesure n'est prise.

3.5.3 L'horloge synchronisée à l'heure universelle - Cloc

La procédure d'interruption Cloc a comme fonction la gestion d'une horloge synchronisée à l'heure universelle. Elle est installée sur l'interruption matérielle \$0F ou sur l'interruption matérielle \$0D. Ces interruptions sont associées aux ports parallèles 1 et 2. L'interruption est déclenchée par un changement de niveau sur la ligne ACK du port. Le récepteur horaire se branche donc sur le connecteur du port parallèle du PC.

La gestion d'une horloge synchronisée à l'heure universelle est nécessaire pour satisfaire les besoins de la commande SYNC. Cette commande calcule le décalage entre les horloges d'une balise et du PC. Cette fonction du programme Sis3 est très importante, car elle permet la connaissance exacte du temps d'arrivée des séismes enregistrés. Ceci est fondamental dans la plupart d'applications en sismologie.

L'horloge du programme Sis3 est synchronisée à l'heure universelle, avec une dérive et une précision qui sont celles de la base de temps extérieure. Dans notre configuration, on a utilisé comme base de temps un récepteur Télécode (Observatoire de Neuchâtel, Suisse). Nos récepteurs se synchronisent au signal radio DCF (77.5 kHz, Mainflingen, Allemagne). L'heure est fournie au PC en format Télécode.

Le format Télécode est constitué par des tops seconde qui ont une précision de 1 milliseconde, si la réception du signal horaire est bonne. Le flanc montant du top indique le début de la seconde. La durée du top peut avoir deux valeurs : 0.25 secondes ou 0.5 secondes. Ces deux valeurs sont utilisées pour faire un codage binaire sur 59 bits (0 et 1 logique). L'ensemble est une trame minute qui contient l'heure et la date universelle. La fin de la trame minute est indiquée par l'absence du top 59.

Le signal DCF couvre suffisamment bien la région alpine et le reste du territoire français. Le récepteur Télécode peut être modifié en usine pour utiliser d'autres signaux horaires : HBG en Suisse, MSF en Grande Bretagne et WWVB aux Etats Unis. Pour des applications dans des sites qui ne sont pas couverts par ces émissions, la société Leas a développé un récepteur qui se synchronise aux signaux satellites du système GPS (Global Positioning System). Ce système couvre toute la surface de la terre. Ces récepteurs s'appellent Locsat, ils fournissent l'heure en format Télécode.

Bien que ces deux alternatives soient des solutions intéressantes à la plupart d'applications en sismologie, d'autres alternatives sont possibles. La procédure Cloc peut aussi fonctionner

avec des bases de temps plus simples, fournissant seulement des tops seconde (sans marque de minute) ou seulement des tops minute. Dans ces deux cas, un décodage initial de l'heure absolue est, bien sur, impossible. L'heure doit être donc introduite manuellement par l'utilisateur. L'horloge se synchronisera avec l'arrivée du premier top (seconde ou minute). Le type de récepteur utilisé doit être indiqué dans le fichier d'initialisation SIS3.INI.

Pour comprendre le fonctionnement de l'horloge Sis3 il faut d'abord décrire celui de l'horloge standard du PC. Cette horloge est constituée par

- le circuit intégré 8254,
- la variable Bios \$0040:006C, connue aussi comme le chronomètre.

Le 8254 est un compteur programmable, 16 bits, qui génère une interruption matérielle chaque fois qu'un cycle de comptage est terminé. Le 8254 est piloté par un signal d'horloge issu du circuit oscillateur du PC. Ce signal a une fréquence égale à 1193182 Hz. Le 8254 est programmé pour compter à partir de sa valeur maximale, égale à 65535. Un cycle est complété toutes les 55 millisecondes, quand le compteur arrive à sa valeur minimale, c'est-à-dire 0. L'interruption générée par le 8254 est, en effet, l'interruption matérielle \$08, qui déclenche la procédure d'interruption Tim.

La procédure installée par le système d'exploitation MS-Dos sur l'interruption \$08 a plusieurs fonctions. D'abord, elle intervient dans le contrôle des intervalles de temps qui régissent les opérations d'accès au disque dur. Ensuite, elle incrémente le chronomètre. Le chronomètre est une variable Bios de 32 bits qui se trouve à l'adresse \$0040:006C et qui s'occupe de compter toutes les interruptions matérielles \$08. Le chronomètre est remis à zéro à minuit. Il est utilisé par le système pour déterminer l'heure et la date de l'horloge standard. Ceci explique le manque de précision de cette horloge.

Nous nous servons du compteur 8254 et du chronomètre pour obtenir une horloge de haute précision, synchronisée à l'heure universelle. Pour ce faire on utilise un compteur de secondes

de 32 bits, que l'on appellera PcSecCtr et un compteur de jours de 32 bits que l'on appellera PcJCtr. Chaque fois qu'un top seconde arrive, la procédure Cloc incrémente la valeur de PcSecCtr. Les valeurs du compteur 8254 et du chronomètre, à l'arrivée du top, sont stockées dans les variables TopHardCtr et TopSoftCtr.

Quand le programme Sis3 a besoin de l'heure (comme dans le cas de la commande SYNC), il lit le compteur PcSecCtr qui lui fournit le temps avec une précision d'une seconde. Il procède, ensuite, à la lecture du 8254 et du chronomètre. Il compare ces valeurs avec les variables TopHardCtr et TopSoftCtr. Ce processus permet la connaissance du temps écoulé entre l'arrivée du top seconde et la demande de l'heure, avec une précision égale à la résolution du compteur 8254. Cette résolution est égale à $1/1193182$, c'est-à-dire 0.84 microsecondes. La date est déterminée à partir du compteur de jours PcJCtr. La date qui est utilisée comme origine est le 1 janvier 1987.

On peut maintenant présenter la démarche suivie par la procédure Cloc chaque fois qu'un top seconde arrive.

- a). Cloc lit le compteur 8254 et le chronomètre. Il écrit ces valeurs dans les variables TopHardCtr et TopSoftCtr.
- b). Cloc calcule le temps écoulé entre le dernier top et le top actuel, elle assigne cette valeur à une variable TopDelta. Si TopDelta est égal à 1 seconde +/- ϵ il s'agit d'un top seconde (ϵ est un intervalle de tolérance égal à 10 millisecondes). Dans ce cas, il faut incrémenter le compteur PcSecCtr.
- c). Si TopDelta est plus grand que 1 seconde +/- ϵ , Cloc considère qu'il s'agit d'un top minute. En effet, les tops minute sont annoncés par l'absence du top 59. Cloc incrémente alors la variable PcSecCtr de deux unités.
- d). A l'arrivée d'un top minute plusieurs alternatives sont possibles.

- i. Si PcSecCtr est égal à 86400, le top minute signale l'arrivée de minuit. PcSecCtr est remis à zéro et le compteur de jours PcJCtr est incrémenté.

- ii. Si la trame minute initiale n'a pas encore été décodée, l'arrivée d'un top minute annonce le début du processus de décodage.

- iii. Si le décodage de la trame initiale est en cours, ce top indique la fin du processus. On peut alors écrire l'heure et la date dans les compteurs PcSecCtr et PcJCtr.

La procédure Cloc ne prévoit pas l'arrivée de faux tops, associés à des bruits électroniques. Ce cas sera pris en considération dans les versions futures du programme Sis3. On utilisera pour ceci l'algorithme de détection de tops de la balise Sismalp 3. Cet algorithme est présenté dans le chapitre 2, paragraphe 2.2.5.

3.5.4 Le gestionnaire de communication par bus PC - Bus

Le gestionnaire de communication Bus est installé sur l'interruption matérielle \$0F ou sur l'interruption matérielle \$0D. Ces interruptions sont associées au port parallèle numéro 1, dans le premier cas, et au port parallèle numéro 2, dans le deuxième cas. Les interruptions sont déclenchées par un changement de niveau dans la ligne IRQ7 (port 1) ou IRQ5 (port 2) du bus PC.

La procédure d'interruption Bus est utilisée seulement par le programme Sis3Bus. Elle s'occupe de la communication entre la balise et sa carte PC, dans le cas d'une configuration Sismalp 3 - PC. Cette communication est faite à travers la carte ComBus, qui est vue, par la balise et par la carte PC, comme un tampon mémoire de 256 octets. La balise a un accès direct à la ligne IRQ7 (ou IRQ5). Elle utilise cette ligne pour déclencher une interruption et indiquer au PC que des données ont été écrites sur la carte ComBus.

Le protocole de communication et la carte ComBus sont décrits avec détail dans le chapitre 4.

3.6 Insertion du programme Sis3 dans le système Sismalp

L'interaction entre le programme Sis3 et le système Sismalp a lieu à deux niveaux. Les événements enregistrés par la balise peuvent être convertis au format Sismalp et incorporés à la base de données du système Sismalp. Ils peuvent alors bénéficier de tous les outils de manipulation de données qui y existent. L'autre niveau d'interaction est l'utilisation de l'outil Sis3 par les programmes d'appel automatique du système Sismalp 3.

3.6.1 La base de données Sismalp

La base de données Sismalp regroupe l'activité sismique des Alpes depuis le 13 septembre 1987⁴. Le réseau Sismalp est constitué de stations permanentes reliées au site central par ligne téléphonique. A la date de rédaction de ce document le réseau compte 40 stations mono composantes et 1 station trois composantes. Avant la fin de l'année 1996 encore 4 stations trois composantes seront installées. Avant cette date aussi, 10 stations Sismalp 3, en configuration mono composante, remplaceront des stations Sismalp 1. Le passage de tout le réseau à l'enregistrement trois composantes dépendra des sources de financement disponibles.

Les données sont regroupées dans des fichiers événement. Chaque fichier événement contient les enregistrements faits par toutes les stations du réseau. Pour avoir accès à un événement avec le programme Pickev, il faut d'abord choisir l'année. Ensuite on doit choisir le mois et finalement le jour. On a ainsi accès à une fenêtre qui contient tous les événements de la

⁴ Il s'agit de la date du premier enregistrement du réseau Sismalp (une station). Le premier séisme localisé (quatre stations) date plutôt du 3 avril 1988.

journée. L'heure associée à l'événement est aussi affichée. Si on sélectionne un événement on a accès aux enregistrements de toutes les stations qui l'ont détecté.

Le programme Pickev peut être aussi utilisé pour visualiser les événements de façon indépendante.

Le programme Sis3 fournit les événements en trois formats différents : format comprimé (*.CMP), format Sismalp 3 (*.SI3) et format Sismalp (*.NDX, *.SIS). L'information peut être regroupée en suivant quatre critères différents :

- un fichier par station,
- un fichier par jour,
- un fichier par mois,
- un fichier par événement.

Le programme Triev du système Sismalp reçoit comme entrée un ou plusieurs fichiers dans l'un des formats précédents et incorpore l'information à la base de données Sismalp. Le premier format est le format par défaut.

3.6.2 Sis3 comme un outil du système Sismalp

Le système Sismalp fait une gestion automatique des appels téléphoniques aux stations. Cette gestion est faite par le programme superviseur⁵. Le programme superviseur prend comme information d'entrée le fichier BALISE.STA. Ce fichier contient une liste de stations et une heure d'appel pour chacune d'elles.

⁵ Le vrai nom du programme superviseur est « Balise ». On n'utilisera pas ce nom pour éviter des confusions avec la balise Sismalp 3.

Le nom des stations Sismalp 3 peut être inclus dans cette liste. Il doit être accompagné d'un caractère « 3 » pour indiquer qu'il s'agit d'une station de type Sismalp 3. Le programme superviseur exécute alors le programme Sis3Mod. Les commandes qui sont exécutées de façon automatique se trouvent dans le fichier SIS3AUTO.INP. Pour le moment, un seul fichier de commandes doit être partagé par toutes les stations Sismalp 3 appelées de façon automatique. Le résultat du dialogue est écrit dans le fichier SIS3MOD.OUT ou dans le journal de bord SIS3MOD.LOG. Les événements seront fournis à l'utilisateur dans un fichier contenant tous les enregistrements d'une station.

Le programme superviseur peut aussi exécuter des programmes extérieurs, à une heure programmée en avance. Dans cette optique, le programme Triev peut être exécuté après la tournée de récupération pour intégrer les nouveaux événements à la base de données Sismalp.

Chapitre 4 - La configuration Sismalp 3 - PC

La flexibilité de l'architecture de la balise Sismalp 3 permet l'interaction entre sa carte microprocesseur et une carte PC. Cette communication est faite en reliant les bus des deux machines. La carte PC joue ainsi le rôle de gestionnaire de haut niveau de la balise. L'utilisateur dispose alors d'une interface souple où il peut implanter des programmes écrits en langage évolué (Pascal ou C) pour traiter les données sismiques sur le terrain ou pour gérer des tâches qui seront exécutées de façon automatique. On a donné à cet ensemble le nom de configuration Sismalp 3 - PC. La figure 2.1(b) (chapitre 2, page 16) présente l'architecture Sismalp 3 PC.

Dans ce chapitre, on fera d'abord une description de la carte PC et du disque dur qu'on a rajouté à l'architecture standard de la balise Sismalp 3. On présentera ensuite la carte ComBus, développée par J. Revilla, qui permet la communication entre le bus du microprocesseur de la balise et celui du microprocesseur de la carte PC. Après ceci, on expliquera le protocole de communication qui permet l'interaction de ces deux architectures. Ensuite, on expliquera les possibilités du programme Sis3Bus (J. Revilla, J. Fréchet) qui permet la programmation et la gestion des tâches dirigées par la carte PC. Finalement, on traitera les alternatives et les perspectives de la configuration Sismalp 3 - PC.

4.1 La carte PC et le disque dur

La balise Sismalp 3 accepte la connexion de n'importe quelle carte compatible PC. Notre choix a été fait en considérant les contraintes de consommation et taille imposées par le cahier

des charges. Nous avons choisi ainsi une carte PCM-3330 386SX PC-104. La norme PC-104 est un standard commercial qui définit des spécifications de taille et de connectique pour des cartes PC et pour des périphériques destinés à des applications autonomes et de basse consommation. La taille définie pour toutes ces cartes est de 90 x 96 mm. Le connecteur PC-104 contient toutes les lignes définies par le bus ISA¹, il occupe pourtant, moins de place et permet l'empilement de plusieurs cartes PC-104.

Le microprocesseur de notre carte est un 80386 SX. Il définit une consommation de 1.9 A sous 5 volts, 9.5 W, pour la carte CPU. Une version avec microprocesseur 80486SLC est aussi disponible. Elle est plus performante mais elle implique une augmentation dans la consommation de l'énergie (2.6 A sous 5 volts, 13 W). Quatre tailles de mémoire vive sont disponibles 512 Koctets, 1 Moctet, 2 Moctets et 4 Moctets. La plupart de nos applications utilisent une mémoire vive égale à 2 Moctets.

Nous avons choisi un disque dur type PCMCIA (Viper 340 Mo) pour implanter le logiciel qui contrôle le fonctionnement de la carte PC et pour stocker les données sismiques enregistrées par la balise. Ce standard spécifie des disques avec une taille égale à celle d'une carte crédit (55 x 85 mm) et avec une épaisseur de 1 centimètre. D'autre part, les disques PCMCIA ont une faible consommation d'énergie. Ceci est dû à la taille réduite de la mécanique qui intervient. Notre disque consomme 0.5 A sous 5 volts (2.5 W). D'autres caractéristiques du standard PCMCIA sont : une grande résistance aux accélérations et un connecteur solide qui facilite l'extraction et la manipulation du disque. Nous avons trouvé des disques PCMCIA avec une capacité de stockage non négligeable : 130, 170, 260 et 340 Moctets. Toutes ces spécifications techniques font de ces dispositifs un outil très intéressant pour les applications sur le terrain.

¹ ISA (Industrie Standard Architecture). Ce bus a été introduit par les ordinateurs IBM-AT (80286). Il s'agit d'un bus avec 16 bits pour les données et 24 bits pour les adresses. Ce bus est maintenant utilisé par la plupart d'ordinateurs compatibles PC.

L'interaction entre la carte PC et le disque dur est assurée par une carte PCM 3110 PC-104. Il s'agit d'une carte qui permet l'utilisation d'un dispositif PCMCIA quelconque. Un deuxième périphérique PCMCIA peut être utilisé en rajoutant la carte PCM 3111 PC-104. Cette option ouvre des alternatives très intéressantes à la balise Sismalp 3 - PC. Un modem pourrait être ainsi ajouté ou une interface SCSI pour connecter d'autres périphériques de stockage (DAT ou disque optique).

La consommation de la carte PC (80386 SX) est de 1.9 A sous 5 volts (9.5 W). L'ensemble carte PC, carte PCMCIA et disque dur consomme 2.4 A sous 5 volts (12 W). Dans la configuration Sismalp 3 - PC, cet ensemble est alimenté seulement lors d'un vidage des données ou lors d'une communication téléphonique. Cette gestion diminue radicalement la consommation réelle de la configuration Sismalp 3 - PC. Pour un enregistrement continu à 100 Hz, la consommation effective de l'ensemble PC est de l'ordre de 400 mW (voir paragraphe 4.6).

4.2 La carte de communication ComBus

Le vidage des données doit être fait de la façon la plus rapide possible, pour diminuer le temps d'alimentation de l'ensemble PC. Nous avons choisi pour cela une communication entre le bus du microprocesseur de la balise et celui de la carte PC. Ce genre de communication pose un problème d'ordre matériel. En effet, le microprocesseur de la balise (MC68HC11) est fabriqué par la société Motorola, alors que l'architecture du microprocesseur de la carte PC (80386 SX) a été définie par la société Intel. Les bus de ces deux composants sont donc incompatibles. On a développé une carte de communication qui assure une compatibilité matérielle et qui permet l'implantation d'un protocole de communication simple et efficace. Nous l'avons appelé la carte ComBus.

La carte ComBus a été développée autour du composant DS1609 fabriqué par la société Dallas Semiconductors. Il s'agit d'un tampon de 256 octets qui peut être adressé par les deux microprocesseurs. La carte ComBus permet une communication qui peut atteindre les 15000

octets par seconde. Cette vitesse assure un vidage de la mémoire vive de la balise (2 Moctets) en moins de 3 minutes.

Une communication par bus peut atteindre des vitesses supérieures à celle-ci. Nous avons été limités par la fréquence d'opération du microprocesseur de la balise, le HC11. Ce microprocesseur a une horloge externe de 12 MHz et une horloge interne de 3 MHz. Cette vitesse est faible comparée à celle des ordinateurs PC actuels².

Un autre facteur qui ralentit le processus est la caractéristique multi-tâche du programme de la balise. Ce programme doit aussi gérer l'acquisition, calculer le rapport STA/LTA, calculer la moyenne du signal, compresser les données, construire un événement s'il y a un déclenchement et faire la gestion de la mémoire vive de la balise. Tout ceci dans deux modes d'enregistrement qui peuvent coexister (l'enregistrement continu et l'enregistrement par déclenchement). Le microprocesseur ne peut pas se consacrer à part entière à la communication. Celle-ci doit être donc gérée avec des interruptions.

Nous avons deux autres alternatives comme support matériel pour la communication : le port parallèle et le port série. Aucune de ces deux interfaces ne permet une communication plus rapide.

Le port parallèle dispose d'un registre bidirectionnel de 8 bits d'entrée/sortie. Le transfert des données doit être fait octet par octet. L'avantage de la carte ComBus est qu'on dispose d'un registre de 256 octets. Chaque fois que le programme de la balise est interrompu, il peut envoyer un paquet de 256 octets vers la carte PC.

Finalement, le port série de la balise est limité à une vitesse de 19200 bps, voire 1920 octets par seconde. Ceci à cause des limitations du microprocesseur qui ont été présentées ci-dessus.

² Mon PC portable a comme microprocesseur le 80486DX-2-50. Son bus de données externe a une vitesse d'opération égale à 25 MHz. Le bus interne opère à 50 MHz.

4.3 Le protocole de communication ComBus

La carte ComBus peut être visualisée comme un tampon de 256 octets qui peut être accédé par le bus Motorola, d'un côté, et par le bus Intel de l'autre côté. La figure 4.1 montre un schéma de blocs qui sera utile pour décrire le protocole de communication que nous avons développé.

On a défini une communication half-duplex, par paquets de 256 octets. Deux interruptions, une de chaque côté, sont utilisées pour communiquer à l'interlocuteur que des données viennent d'être écrites. Deux lignes sont utilisées pour accuser réception d'une interruption.

Les conflits d'accès, ou collisions, sont évités grâce à l'utilisation d'un jeu de jetons qui définissent les droits des participants. Six jetons sont disponibles : \$55, \$56, \$57, \$AA, \$AB et \$AC. Les trois premiers sont destinés à l'usage du HC11, les autres à celui du PC. Les jetons sont présentés dans le tableau ci-dessous.

<i>HC11</i>	<i>PC</i>	<i>Description</i>
\$55	\$AA	Occupation du tampon pendant une opération d'écriture ou de lecture.
\$56	\$AB	Libération du tampon après une opération d'écriture .
\$57	\$AC	Libération du tampon après une opération de lecture.

Tableau 4.1 - Les jetons utilisés par le protocole de communication ComBus.

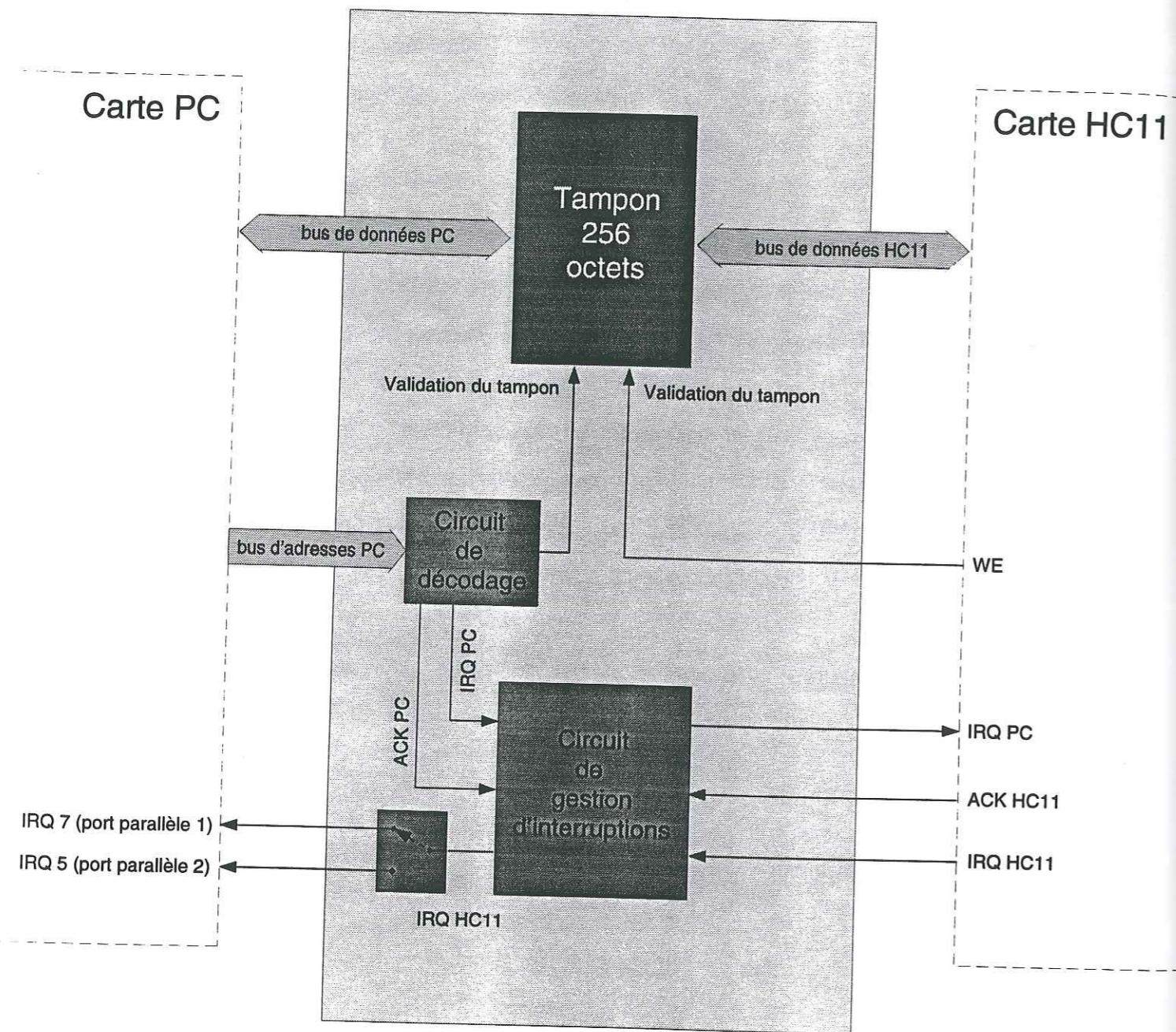


Figure 4.1 - La carte ComBus.

La carte ComBus est un tampon de 256 cases, numérotées de 0 à 255. La case numéro 0 est réservée à l'écriture du code de la commande qui est en train d'être traitée. Ceci permet l'identification immédiate de la commande. Les 253 cases qui suivent sont destinées au transfert des données. La case 254 contient la taille du message qui a été écrit. Cette taille n'inclut pas les cases 0, 254 et 255. La case 255, enfin, est utilisée pour le transfert des jetons présentés ci-dessus.

La case numéro 254 est aussi utilisée pour connaître la fin du message. Cette case nous épargne l'utilisation d'une séquence de fin de chaîne, comme dans le cas d'une communication série. Si le message à envoyer occupe plus de 253 cases, la valeur 255 sera écrite dans la case 254. Ceci indiquera que le tampon est plein mais que d'autres paquets seront envoyés. Si le tampon est plein et qu'il n'y a pas d'autres paquets après, la valeur 253 sera écrite. Il existe aussi la possibilité d'envoyer un message vide, dans ce cas, la valeur 0 sera écrite dans la case 254.

On décrira maintenant le processus qui a lieu quand l'un des participants envoie un message à l'autre. Pour faciliter l'explication, on étudiera le cas où le PC envoie une commande vers la balise.

- Le PC lit la case 256 pour vérifier si le tampon est libre. Cette situation est indiquée par le jeton \$57 ou le jeton \$AC. Un autre jeton signalera une occupation du tampon et, donc, une interdiction du processus.
- Le PC pose le jeton \$AA pour indiquer qu'il occupe le tampon. Ensuite, il procède à l'écriture des données.
- Une fois que les données ont été écrites, le PC pose le jeton \$AB pour libérer le tampon.
- Le PC génère une interruption vers le HC11.

e). Le HC11 reçoit l'interruption. Il procède à la lecture de la case 256. S'il trouve le jeton \$AB, l'interruption est validée. Sinon, il s'agit d'un signal parasite, l'interruption est alors ignorée.

f). Si l'interruption est valide, le HC11 accuse réception en activant sa ligne ACKIRQ.

g). Le HC11 occupe le tampon en posant le jeton \$55 dans la case 256. Ensuite, il procède à la lecture des données. Quand la lecture est finie, il pose le jeton \$57, pour indiquer la libération du tampon. Ensuite, il déclenche une interruption vers le HC11, pour lui signaler la fin de l'opération.

h). Le tampon est maintenant libre.

i). Normalement, le HC11 procède au traitement de la commande envoyée par le PC et envoie ensuite sa réponse. S'il s'agit d'une réponse courte (toutes les commandes, sauf LIST, TEST et TRAN), la réponse de la balise occupera moins de 253 cases. S'il s'agit d'une réponse longue (LIST, TEST et TRAN), plusieurs paquets de 253 octets seront envoyés. Chaque fois que le PC recevra un paquet de 253 octets, il devra répondre en envoyant un paquet vide.

j). Le processus d'envoi des données du HC11 vers le PC est identique à celui indiqué ci-dessus, mais avec inversion de rôles.

Les cases du tampon, la génération d'interruptions et l'activation de la ligne d'accusé de réception sont assignées à des adresses mémoire du côté du PC. Le tableau 4.2 montre les adresses qui ont été utilisées.

<i>Adresse PC</i>	<i>Description</i>
\$1D00:0000 - \$1D00:00FF	Cases du tampon (256 octets).
\$1D00:0100	Génération d'une interruption (1 octet).
\$1D00:0200	Accusé de réception. Ligne ACKIRQ (1 octet).

Tableau 4.2 - Adresses mémoire utilisées par le PC pour la gestion de communication ComBus.

L'écriture ou la lecture des adresses \$1D00:0000 à \$1D00:00FF donnent accès direct aux cases du tampon de la carte ComBus. Une écriture ou une lecture de l'adresse \$1D00:0100 génère une interruption vers le HC11. Une écriture ou une lecture de l'adresse \$1D00:0200 active la ligne d'accusé de réception ACKIRQ.

Le PC reçoit les interruptions du HC11 sur l'entrée de l'interruption matérielle du port parallèle 1 ou sur celle du port parallèle 2. Cette entrée se trouve sur le connecteur du bus du PC. Il s'agit de la ligne IRQ7 pour le port parallèle 1 et de la ligne IRQ5 pour le port parallèle 2. Le choix peut être fait avec des micro-interrupteurs qui se trouvent sur la carte ComBus.

Le HC11 reçoit les interruptions du PC sur son entrée IRQ (interruption masquable). L'activation des lignes d'accusé de réception ACKIRQ a comme objectif le déblocage d'un circuit logique de gestion d'interruptions qui se trouve sur la carte ComBus.

4.4 Le programme Sis3Bus

Le programme Sis3Bus est une version du programme Sis3 (J. Revilla et J. Fréchet). Il a été écrit pour exploiter toutes les possibilités de la configuration Sismalp 3 - PC. Il est installé sur la carte PC de la balise et s'occupe de l'exécution automatique des tâches. Le programme Sis3Bus peut être aussi utilisé comme un outil de communication par un programme de plus haut niveau. Ce programme de plus haut niveau peut être écrit par l'utilisateur pour traiter les données sismiques sur le terrain. La figure 3.3 (chapitre 3, page 81) présente la configuration Sis3Bus.

Le programme Sis3Bus permet l'envoi et le traitement de toutes les commandes de l'interface utilisateur qui ont été décrits dans le chapitre 3. Dans le cas qui nous concerne maintenant, les commandes ne sont pas introduites directement par l'utilisateur. Elles doivent être écrites dans un fichier qui sera lu au démarrage (cf. chapitre 3, paragraphe 3.1.5). Elles peuvent être aussi passées comme des paramètres de la ligne d'exécution du programme (cf. chapitre 3, paragraphe 3.3.1). Dans ces deux cas, un nombre illimité de commandes peut être envoyé vers la balise. Les réponses de la balise sont traitées par le programme Sis3Bus et les résultats écrits dans un fichier qui peut être étudié après par l'utilisateur.

L'intégration du programme Sis3Bus dans le système Sismalp 3 - PC est présentée dans le paragraphe qui suit.

4.5 Fonctionnement du système Sismalp 3 - PC

La carte PC est éteinte en fonctionnement normal. Six situations différentes peuvent provoquer son réveil.

La balise dispose d'une mémoire de 2 Moctets pour le stockage des événements sismiques. Cette mémoire peut être allouée à deux modes d'enregistrement différents : l'enregistrement par déclenchement et l'enregistrement continu. Quand l'espace alloué à l'un de ces deux

modes d'enregistrement dépasse un certain seuil de remplissage, la balise réveille la carte PC, pour permettre ainsi un vidage des données sur le disque dur.

Le PC sera réveillé aussi quand la balise détectera un appel téléphonique. En effet, dans la configuration Sismalp 3 - PC, le PC s'occupe de la gestion de la communication téléphonique.

La troisième alternative est un réveil périodique programmé par l'utilisateur avec la commande de dialogue WAKE.

La quatrième alternative est un réveil manuel, lors d'une intervention sur le terrain. Ceci est fait avec l'aide d'un bouton poussoir qui se trouve à l'intérieur de la balise.

La cinquième alternative est un réveil lors d'une remise à zéro de la balise. La dernière est l'envoi de la commande PCON.

Au démarrage de la carte PC, le système d'exploitation procédera à l'exécution des commandes qui se trouvent dans le fichier batch AUTOEXEC.BAT. Ce fichier peut être modifié à volonté par l'utilisateur. Dans notre configuration, il contient, parmi d'autres commandes, l'appel du programme Sis3Bus. Deux alternatives sont maintenant possibles, soit on exécute le programme Sis3Bus avec une chaîne de commandes soit on lui fournit une liste de commandes dans le fichier SIS3BUS.INP. La dernière alternative est conseillée pour les raisons exposées ci-dessous.

L'introduction des commandes par fichier SIS3BUS.INP, combinée avec l'usage des boîtes aux lettres de la balise, ouvre des possibilités intéressantes. Dans notre configuration, la balise écrit un message dans la boîte aux lettres numéro 1 (commande WBOX) indiquant la cause du réveil du PC. Le programme Sis3Bus lit cette boîte aux lettres au démarrage. Il peut ainsi choisir entre plusieurs fichiers INP (SIS3BUS1.INP, SIS3BUS2.INP, SIS3BUS3.INP, SIS3BUS4.INP ...). Chacun de ces fichiers contiendrait alors une suite des commandes adaptée au cas de réveil particulier.

S'il s'agit d'un réveil à cause du remplissage de la mémoire vive de la balise, la carte PC enverra une commande pour vider les événements sur son disque dur (commande TRAN* ou TCTN*). Notons au passage que la boîte aux lettres peut indiquer la zone mémoire qui a été remplie (enregistrement par déclenchement ou enregistrement continu). Ensuite, d'autres commandes peuvent être envoyées pour avoir une liste des en-têtes des fichiers (LIST*, LCTN*), pour libérer la mémoire (DELE*, DCTN*), pour connaître l'heure de la balise (CLOC), les paramètres d'acquisition (MODE) et d'autres informations qui pourraient intéresser l'utilisateur. Ensuite, la terminaison du processus est provoquée avec la commande EXIT, qui déconnectera l'alimentation de la carte PC. Cette coupure ne sera pas faite immédiatement, un délai de 5 secondes est prévu pour permettre au programme Sis3Bus de sortir proprement.

Un réveil programmé (commande WAKE) obéit à des besoins qui dépendent de l'utilisateur. Le Centre d'Etudes de la Neige utilise cette alternative pour récupérer des données sismiques associées à des avalanches. Ensuite, ils traitent les données sur place et ils transmettent les résultats au satellite Météosat. Le réveil périodique est très utile dans ce cas, car le satellite Météosat définit des plages horaires restreintes pour chaque utilisateur.

S'il s'agit d'un réveil provoqué par un appel téléphonique venant de l'extérieur, le programme Sis3Bus passera un message au processus AUTOEXEC.BAT et se terminera ensuite. Le processus AUTOEXEC.BAT recevra ce message et exécutera un logiciel de communication qui prendra à sa charge la suite des opérations.

Plusieurs alternatives sont possibles pour passer un message, d'un programme quelconque vers le processus AUTOEXEC.BAT. Nous allons décrire les deux les plus simples. La première consiste à créer un fichier si une condition est vraie et à ne pas le faire si la condition est fausse. Le processus AUTOEXEC.BAT dispose alors du conditionnel IF et de la condition EXIST[nom du fichier] pour vérifier l'existence du fichier. Si la condition est vraie, la commande qui se trouve à la suite est exécutée, sinon elle sera ignorée.

La deuxième alternative consiste à terminer le programme (Sis3Bus à l'occasion) avec une condition d'erreur. Le compilateur Pascal qu'on a utilisé (Borland Pascal 7.01) dispose d'une commande qui s'appelle HALT[niveau de l'erreur]. Cette commande provoque un arrêt immédiat du programme avec une modification de la variable DOS « ErrorLevel ». Le processus AUTOEXEC.BAT peut alors utiliser le conditionnel IF lié à la condition ERRORLEVEL[valeur] pour vérifier la valeur de cette variable DOS. Si « valeur » est supérieur ou égal à la variable DOS, la commande qui suit sera exécutée, sinon elle sera ignorée.

Deux logiciels sont actuellement testés pour gérer la communication téléphonique entre l'utilisateur au site central et la carte PC.

Le premier s'appelle MS Kermit, il a été développé par l'Université de Columbia, New York (Etats-Unis) Il s'agit d'un protocole de communication qui propose une approche standard pour transmettre des fichiers et faire des émulations de terminal. MS Kermit est distribué gratuitement. Il devient un standard de communication entre ordinateurs.

Le deuxième logiciel s'appelle Carbon Copy, il a été développé par la société Microcom. Ce programme permet une prise de commandes à distance. Dans ce mode d'opération, l'utilisateur a accès direct au PC de la balise. Les opérations se déroulent comme s'il était connecté directement avec un clavier et un écran.

Une fois que l'un de ces deux logiciels a pris contrôle de la communication, l'utilisateur peut utiliser le programme Sis3Bus pour envoyer des commandes vers la balise. Dans ce cas, les commandes seront envoyées comme des paramètres du programme Sis3Bus (chaîne des commandes). On peut aussi exécuter à distance l'interface utilisateur du programme Sis3Bus. Cette dernière alternative doit ralentir le processus de façon considérable.

Une intervention sur le terrain peut se dérouler de plusieurs façons. L'utilisateur peut provoquer un réveil manuel du PC, en appuyant sur un bouton poussoir qui se trouve à l'intérieur de la balise. Le programme Sis3Bus pourrait alors faire un vidage de la mémoire vive avant de rendre la main à l'utilisateur.

Si l'utilisateur ne souhaite pas attendre le temps de vidage (3 minutes maximum), il peut extraire le disque dur sans réveiller le PC. Il peut ensuite remettre un disque vierge, terminant ainsi l'intervention sur le terrain. D'autre part, si l'utilisateur ne dispose pas de disque dur vide pour faire l'échange, une autre alternative est possible si son ordinateur portable dispose d'un lecteur PCMCIA. En effet, il peut vider le disque dur PCMCIA sur le disque dur de son ordinateur portable, l'effacer ensuite et le remettre dans la balise. L'utilisateur peut même faire une vérification immédiate des données sur le terrain avec le programme Pickev qui serait installé sur son ordinateur portable.

Si l'utilisateur souhaite envoyer des commandes de dialogue vers la balise, il établira une communication directe avec elle. Ceci se fera à travers une liaison directe qui ne passera pas par le PC.

Si l'utilisateur souhaite contrôler la suite des opérations avec plus de flexibilité, lors d'un réveil, une autre solution est disponible. Dans ce cas, l'utilisateur peut bloquer l'utilisation du fichier de commandes SIS3BUS.INP. Ceci est fait en modifiant une ligne du fichier d'initialisation SIS3BUS.INI. L'utilisateur peut alors exécuter le programme Sis3Bus (depuis le programme batch) avec une chaîne de commandes. Une autre alternative est le contrôle des opérations par un programme de haut niveau écrit par l'utilisateur. Ce programme utiliserait le programme Sis3Bus comme un outil de communication.

Dans tous les cas précédents, les sorties seront envoyées sur un fichier de sortie SIS3BUS.OUT. Ce fichier peut être étudié a posteriori avec un éditeur de texte.

4.6 Applications et perspectives de la configuration Sismalp 3 - PC

La configuration Sismalp 3 - PC ouvre des nouvelles perspectives aux applications en sismologie.

L'enregistrement continu peut être fait maintenant avec des bonnes caractéristiques d'autonomie et consommation d'énergie. La compression de données en temps réel, faite par la balise (algorithme delta), permet un taux d'enregistrement de 1 Moctet par heure ($f_{acq} = 100$ Hz, gain programmable = 1). Si toute la mémoire vive (2 Moctets) est destinée à l'enregistrement continu, le PC sera réveillé toutes les deux heures. Si l'on considère que le vidage de la mémoire se fait à une vitesse de 15000 octets par seconde, le PC restera alimenté pendant moins de 3 minutes. Sachant que la balise consomme 720 mW de façon permanente, et que l'ensemble PC consomme 12 W chaque fois qu'il est réveillé, on peut calculer une consommation permanente équivalente à 1.02 W pour la configuration Sismalp 3 - PC.

Les disques durs PCMCIA qu'on a trouvés sur le marché ont une taille égale à 130, 170, 260 et 340 Moctets. Cela donne à la balise une autonomie de fonctionnement de 5 jours, 1 semaine, 10.8 jours et 2 semaines, avec les caractéristiques d'acquisition décrites ci-dessus.

La connexion d'un lecteur DAT (2 giga octets) est en train d'être étudiée. Ceci donnerait à la balise une autonomie de 2 ou 3 mois. La consommation d'énergie dans ce cas n'a pas encore été déterminée.

Une autre alternative intéressante qui est étudiée est l'utilisation de modems connectés à des téléphones portables (GSM). Les tendances actuelles du marché technologique laissent prévoir des développements importants de ce genre de réseaux. On peut imaginer une baisse considérable des coûts d'utilisation. Cette nouvelle possibilité permettrait une communication téléphonique dans des endroits où les lignes physiques ne sont pas disponibles. Ceci permettrait le suivi, presque en temps réel, de sites isolés et éloignés des concentrations urbaines.

D'autres périphériques compatibles PC-104 peuvent être connectés pour augmenter les possibilités de la configuration Sismalp 3 - PC. La carte PCM-3410 Super I/O Module rajoute tous les périphériques nécessaires pour une configuration PC standard. On disposerait ainsi de:

- un contrôleur de disque dur IDE pouvant supporter jusqu'à deux disques,
- un contrôleur de lecteur de disquettes pouvant supporter jusqu'à deux lecteurs,
- un port parallèle bidirectionnel,
- deux ports série.

D'autre part, la carte PCM 3111 PC-104 génère un deuxième connecteur PCMCIA qui pourrait être utilisé pour connecter un modem ou une interface SCSI. Une interface SCSI permettrait la connexion d'un support de stockage de masse (un DAT ou un disque optique).

Dans le chapitre 6 « Applications et conclusions » on décrira quelques applications de la balise Sismalp 3 - PC qui ont été déjà mises en opération, en France et à l'étranger.

Chapitre 5 - La calibration des stations Sismalp 3

Dans ce chapitre, on présente la procédure de calibration utilisée pour étalonner les sismomètres trois composantes de la balise Sismalp 3. La fonction de transfert de la balise ne peut pas être déterminée de façon expérimentale avec notre méthode. Néanmoins, une expression analytique a été obtenue à partir des spécifications techniques. On verra que, grâce aux caractéristiques de la balise Sismalp 3, cette expression est simple et fiable. On utilisera pour désigner l'ensemble balise + capteur le terme « station Sismalp 3 ». On a utilisé comme référence les articles de Berger *et al.* (1979), Steck et Prothero (1989) et Fels et Berger (1994).

La procédure consiste à appliquer un courant binaire pseudo-aléatoire sur la bobine de calibration du sismomètre. Ce signal a un spectre presque plat qui contient plus d'énergie qu'un échelon ou qu'une impulsion, pour des valeurs équivalentes de courant. Ensuite, on utilise une méthode interspectrale pour trouver la fonction de transfert de la station à partir de sa réponse au signal de calibration. Cette méthode nous fournit le spectre discret de la fonction de transfert. Nous avons voulu trouver une expression analytique qui puisse représenter de façon continue cette courbe. On a donc élaboré un modèle analytique pour la station et on a modifié les paramètres du sismomètre pour l'ajuster à la fonction de transfert expérimentale. La procédure utilisée est une minimisation de moindres carrés, qui applique la méthode du simplexe pour la modification des paramètres.

Le signal de calibration est généré par la balise Sismalp 3. Ce processus a été automatisé et peut être programmé de façon périodique. Le programme qui calcule la fonction de transfert est écrit en fortran sous Unix. Le programme Sac (Seismic Analysis Code) est utilisé pour visualiser les résultats.

Le premier paragraphe du chapitre présente les différentes méthodes de calibration qui sont décrites par la littérature scientifique. Ce paragraphe concerne surtout les signaux que l'on peut utiliser pour calibrer une station. Le paragraphe 5.2 décrit le signal binaire pseudo-aléatoire et le compare avec d'autres signaux de calibration. Le paragraphe 5.3 présente la méthode interspectrale utilisée pour déterminer la fonction de transfert de la station. Le paragraphe 5.4 décrit la procédure de minimisation que l'on a appliquée pour ajuster les paramètres du sismomètre aux résultats expérimentaux. Le paragraphe 5.5 montre la démarche suivie pour la détermination des modèles analytiques du capteur et de la balise. Le paragraphe 5.6 décrit l'application de l'opération de calibration et présente les résultats obtenus. On explique aussi les raisons qui nous empêchent la détermination expérimentale des paramètres de la balise. Les conclusions tirées de cette expérience sont exposées dans le paragraphe 5.7.

5.1 La calibration des stations sismiques

La connaissance exacte de la forme de l'onde sismique est nécessaire pour la plupart des applications en sismologie. Des sujets particulièrement sensibles sont le calcul du moment sismique ou l'étude du mouvement de particules. Malheureusement, dans la plupart des cas, les distorsions en phase ou en amplitude sont négligées ou mal calculées. Ce problème se présente aussi dans des réseaux composés par des stations et des capteurs différents. Il faut enlever les particularités instrumentales avant de rassembler les données. La réponse instrumentale peut aussi être utile pour faire une étude de l'évolution des paramètres de la station. On pourrait ainsi identifier les composants qui sont sensibles à des variations de température ou à l'usure du temps. Enfin, une bonne procédure de calibration peut être utilisée pour détecter rapidement des capteurs défectueux ou des problèmes associés au système d'acquisition.

La calibration nous permet d'obtenir la réponse en amplitude et en phase de la chaîne d'acquisition. Cette fonction de transfert peut être caractérisée par des courbes dans le domaine de la fréquence ou par un modèle analytique du système. La dernière alternative est de loin la meilleure. Un modèle analytique est représenté par une expression mathématique. Une fois que cette expression a été déterminée, il suffit de stocker ses paramètres pour la reproduire à tout instant. D'ailleurs, une expression analytique nous permet d'avoir une idée plus claire du comportement physique du système. Si l'on a une vision claire du phénomène physique, on peut tirer des conclusions et faire des extrapolations au delà de l'intervalle de validité de la réponse trouvée. Les paramètres d'une expression analytique peuvent être déterminés de façon expérimentale.

Plusieurs méthodes de calibration ont été développées pour déterminer la réponse instrumentale d'une chaîne d'acquisition sismique. Ces méthodes peuvent être classées par rapport au type de signal de calibration utilisé. On distingue trois groupes : les méthodes stationnaires, les méthodes transitoires et les méthodes aléatoires.

5.1.1 Les méthodes stationnaires

Les méthodes stationnaires utilisent des signaux de calibration stationnaires et mono-fréquentiels. Le signal peut être du type mécanique, gravitationnel ou électrique.

Une table vibrante peut être utilisée pour exciter le capteur avec un mouvement du sol. Ce type de signal est celui qui se rapproche le plus du phénomène sismique. Malheureusement, les tables vibrantes sont des dispositifs complexes et chers. Elles ne peuvent pas être utilisées pour faire des calibrations routinières.

Konrad (1970) propose la force gravitationnelle d'un système rotatif pour la calibration d'accéléromètres. Bernard *et al.* (1991) ont développé une machine qui est constituée de deux poids qui diffèrent légèrement et qui tournent autour d'un axe. Ils la placent à une distance d'un mètre du capteur et la font tourner à des vitesses entre 2000 et 50 tours par seconde. Leur

méthode est utilisée pour tester *in situ* les sismomètres du réseau Geoscope (Romanowicz *et al.*, 1991), les caractéristiques des capteurs pouvant varier pendant le transport et l'installation.

Tarbeyev *et al.* (1994) proposent un champ gravitationnel uniforme, plat, de direction variable pour calibrer des sismomètres, des accéléromètres et d'autres instruments gravi-inertiels de haute sensibilité. Ils utilisent une sphère solide de 600 mm. de diamètre, avec une cavité excentrée de 475 mm. Le champ gravitationnel à l'intérieur de la cavité est uniforme. Ils placent ensuite un sismomètre trois composantes à l'intérieur de cette cavité. Le sismomètre est fixé à un support vertical extérieur qui le désolidarise de la sphère. Finalement, ils font tourner la sphère autour de son axe géométrique, à une vitesse constante. Les trois axes du sismomètre sont symétriques par rapport à la verticale. Cette procédure génère un champ gravitationnel uniforme ($1.31 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$), qui tourne autour du capteur.

Leurs résultats sont valables à l'intérieur d'un intervalle entre 0.01 et 0.12 Hz. Un sismomètre des mêmes caractéristiques est placé à l'extérieur de la sphère pour servir de référence. Ceci permet d'enlever des effets non désirés, dus aux vibrations induites par le système de rotation. Le support, la plate-forme tournante, le moteur, la sphère et les autres composants du système mécanique ont un poids total égal à 3500 kg.

Pour appliquer un signal électrique stationnaire le capteur doit être équipé d'une bobine de calibration. Un générateur basse fréquence peut fournir un courant sinusoïdal stable. Ce genre de calibration est conseillé pour la mesure de la réponse en phase du système (Mitronovas et Wielandt, 1975) ou pour évaluer la qualité des données multiplexées dans un réseau téléométré (Woodward et Masters, 1989).

La calibration avec un signal électrique stationnaire est un processus lent et de difficile application. Il faut faire une mesure par point. Dans le prochain paragraphe, on verra comment les méthodes transitoires ont des avantages importants par rapport aux méthodes stationnaires.

5.1.2 Les méthodes transitoires

Les méthodes transitoires font usage d'un signal de calibration qui a une durée limitée dans le temps. Ce signal doit contenir suffisamment d'énergie dans l'intervalle du spectre qui nous intéresse. Comme dans le cas antérieur le signal peut être du type mécanique, gravitationnel ou électrique.

Pour générer un signal transitoire mécanique ou gravitationnel on a besoin de dispositifs complexes et coûteux. Par contre, pour générer un signal électrique transitoire on a juste besoin d'un circuit électronique simple ou d'un système d'acquisition avec des sorties programmables. Les signaux transitoires électriques les plus utilisés sont : l'échelon, l'impulsion et le signal binaire pseudo-aléatoire. Nous avons choisi le dernier pour calibrer notre station. Dans le paragraphe 5.2 on fait une comparaison entre ces trois signaux afin de justifier notre choix.

Jusqu'à maintenant, on a mis comme condition nécessaire l'existence d'une bobine de calibration pour l'utilisation d'un signal électrique. Rodgers *et al.* (1995) montrent une méthode transitoire électrique pour des capteurs sans bobine de calibration. Cette méthode consiste à appliquer un courant constant sur la bobine de signal. Une fois que le système s'est stabilisé, le courant est retiré et la bobine de signal est connectée sur le système d'acquisition pour récupérer la réponse. Le résultat est équivalent à l'application d'un échelon de courant.

5.1.3 Les méthodes aléatoires

Il existe enfin une méthode qui fait usage de sources aléatoires d'énergie. Gomberg *et al.* (1988) utilisent des signaux sismiques naturels ou provoqués par des explosions chimiques pour calibrer leurs stations. Pavlis et Vernon (1994) utilisent du bruit sismique. Dans ces deux cas, il s'agit d'une calibration relative. On a besoin d'une station de référence, dont la réponse instrumentale est connue et qui sera placée à côté de la station à calibrer.

5.2 Signal binaire pseudo-aléatoire

On a utilisé un courant transitoire binaire pseudo-aléatoire pour calibrer notre station. On exposera maintenant les avantages que ce signal présente par rapport aux autres signaux transitoires les plus utilisés : l'échelon et l'impulsion.

5.2.1 L'échelon

L'échelon de courant est le signal le plus facile à générer. Malheureusement, il a un spectre qui décroît rapidement vers les hautes fréquences. Le rapport signal sur bruit n'est donc pas suffisamment bon pour une calibration efficace de cette partie du spectre. Berg et Chesley (1976) utilisent des échelons de courant pour calibrer leur système. Ils améliorent leur rapport signal sur bruit en moyennant plusieurs réponses et en faisant une extrapolation quand leur courbe est trop affectée par le bruit.

5.2.2 L'impulsion

L'impulsion de courant est un échelon de courte durée. Il contient plus d'énergie dans les hautes fréquences que l'échelon. Pour un pulse rectangulaire d'amplitude I_0 et durée T on a un spectre égal à :

$$I(\omega) = 2I_0 \left(\frac{\sin(\frac{\omega T}{2})}{\omega} \right) = I_0 T \left(\frac{\sin x}{x} \right) \quad (5.1)$$

Chapman *et al.* (1988) comparent les résultats obtenus avec un échelon et avec une impulsion (durée de 5 ms) pour calibrer un système de courte période. Ils retiennent l'impulsion pour les raisons déjà présentées.

5.2.3 Signal de calibration binaire pseudo-aléatoire

L'échelon et l'impulsion peuvent être générés avec un circuit électronique élémentaire mais ils ne contiennent pas suffisamment d'énergie dans les hautes fréquences. Par contre, un signal binaire aléatoire a un spectre d'énergie plat avec une fréquence de coupure définie par la période minimum de génération. Utiliser un signal aléatoire n'est pas intéressant parce qu'on ne peut pas le reproduire à volonté. Il faudrait, dans ce cas, un canal additionnel pour l'enregistrer pendant la calibration. Or, on peut utiliser un signal binaire pseudo-aléatoire qui a un spectre presque plat. L'avantage est que ce signal peut être reproduit à tout instant à partir de son algorithme de génération.

Le signal BPA (binaire pseudo-aléatoire) a été décrit par Mac Williams et Sloan (1976). Haubrich (1965) et Moore et Farrel (1970) l'ont déjà utilisé dans des applications en sismologie. Plus récemment, Berger *et al.* (1979), Steck et Prothero (1989) et Fels et Berger (1994) l'ont utilisé pour calibrer des stations large bande.

Ce signal est une séquence de niveaux haut et bas dont les durées sont données par bX . b est une séquence binaire pseudo-aléatoire ($b = b_1, b_2, b_3 \dots$) et X est un nombre d'échantillons. Tous les X échantillons, le signal BPA a 50 % de probabilités de changer d'état et 50 % de probabilités de ne pas le faire. Le spectre du signal BPA a une fréquence de coupure à -3 dB égale à :

$$f_c = \frac{f_{acq}}{\pi X} \quad (5.2)$$

f_{acq} est la fréquence d'acquisition. Le premier "trou" dans le spectre apparaît à une fréquence égale à

$$f_h = \frac{f_{acq}}{X} \quad (5.3)$$

La fréquence d'acquisition utilisée pour notre procédure de calibration est de 100 Hz. On doit choisir la valeur X de telle façon que le premier « trou » du spectre se trouve au-dessus des pôles dominants du système. Le modèle analytique du capteur (paragraphe 5.5.1) a deux zéros en 0 Hz et deux pôles autour de 1 Hz, la fréquence naturelle du sismomètre. Si l'on choisit $X=3$ on aura $f_h = 33.3$ Hz. Le temps total enregistré doit être autour de 40 fois la période la plus longue qui nous intéresse. On a fait donc des enregistrements d'une longueur de 40 secondes.

Plusieurs algorithmes peuvent être utilisés pour générer une séquence binaire pseudo-aléatoire, quelques-uns sont proposés dans le livre de Press *et al.* (1986). Celui qui a été choisi est très facile à générer en code assembleur. Il est décrit dans le paragraphe 5.6.1.

Dans les figures 5.1 et 5.2 on compare dans le domaine du temps et dans celui de la fréquence les trois signaux de calibration que l'on a analysés. L'amplitude des signaux est limitée par le courant de calibration maximum conseillé par le fabricant. Au delà de ce courant la bobine de calibration a un comportement non linéaire (Mark Products, communication personnelle). Le signal BPA contient plus d'énergie que l'échelon ou l'impulsion pour des valeurs égales de courant. D'autre part, cette énergie est distribuée de façon uniforme. Dans la figure 5.3 on montre une amplification, dans l'échelle du temps, de la figure 5.1. Ceci nous permet d'apprécier l'allure du signal BPA.

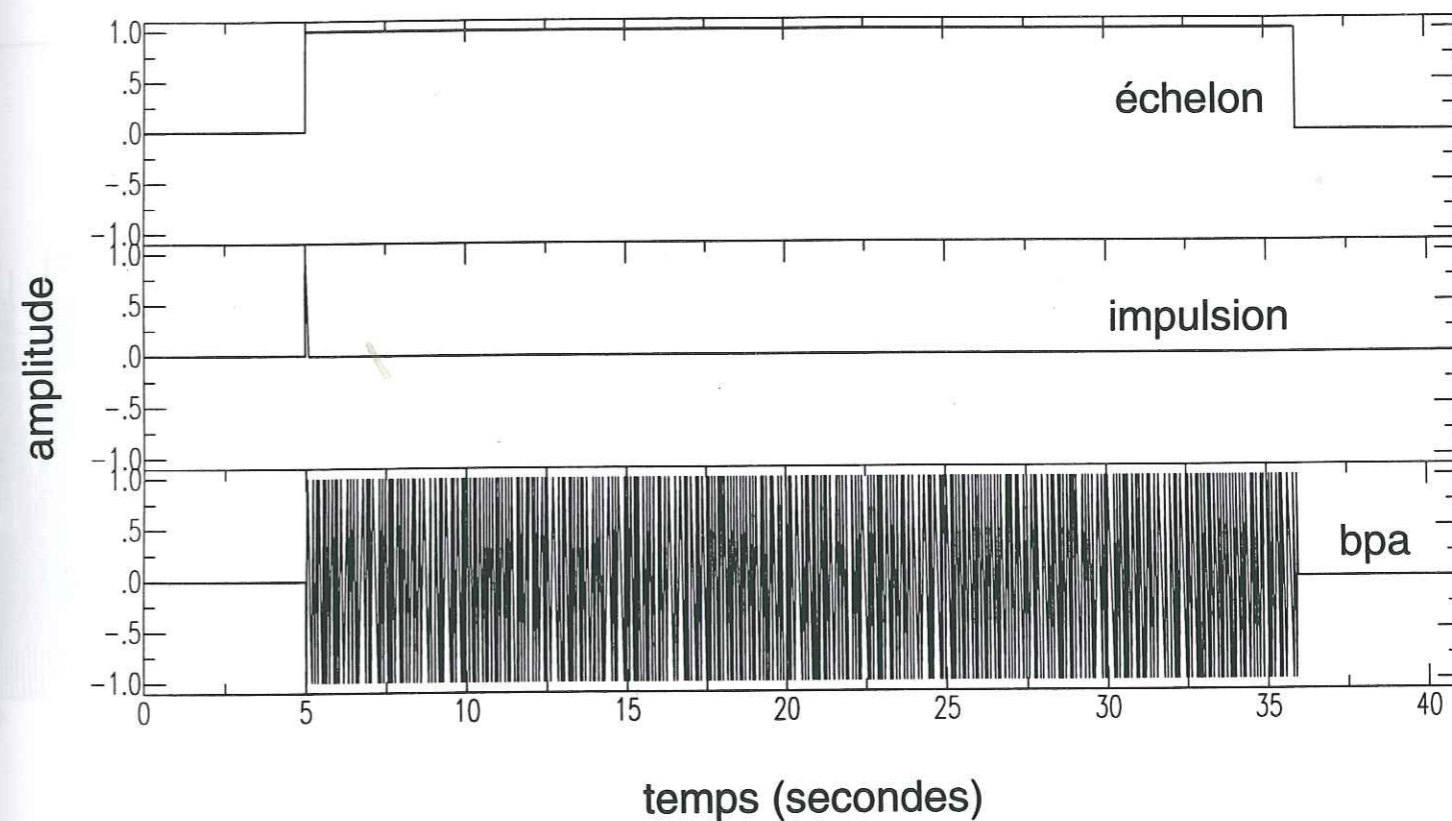


Figure 5.1 - Signaux de calibration, domaine du temps.

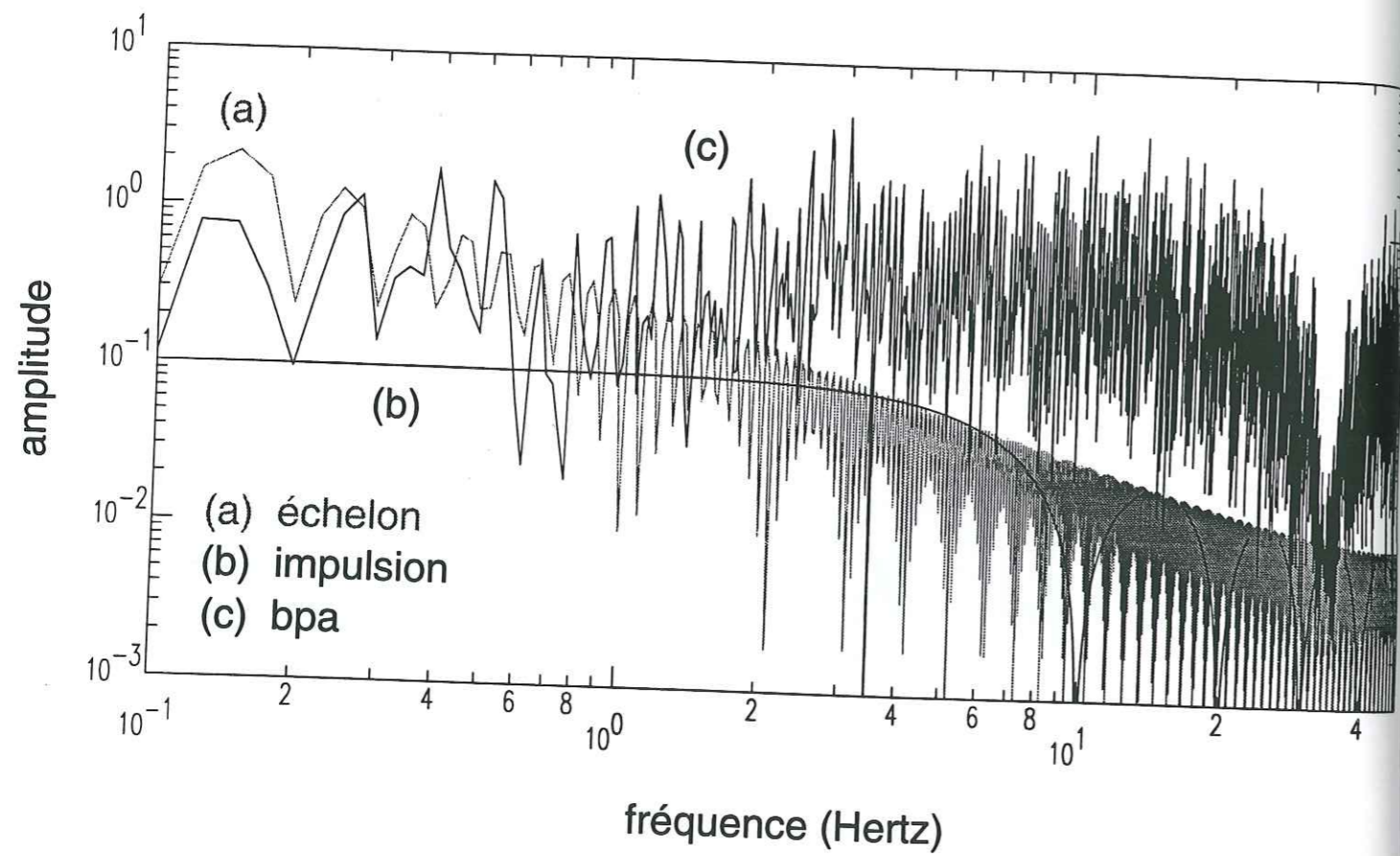


Figure 5.2 - Signaux de calibration, domaine de la fréquence.

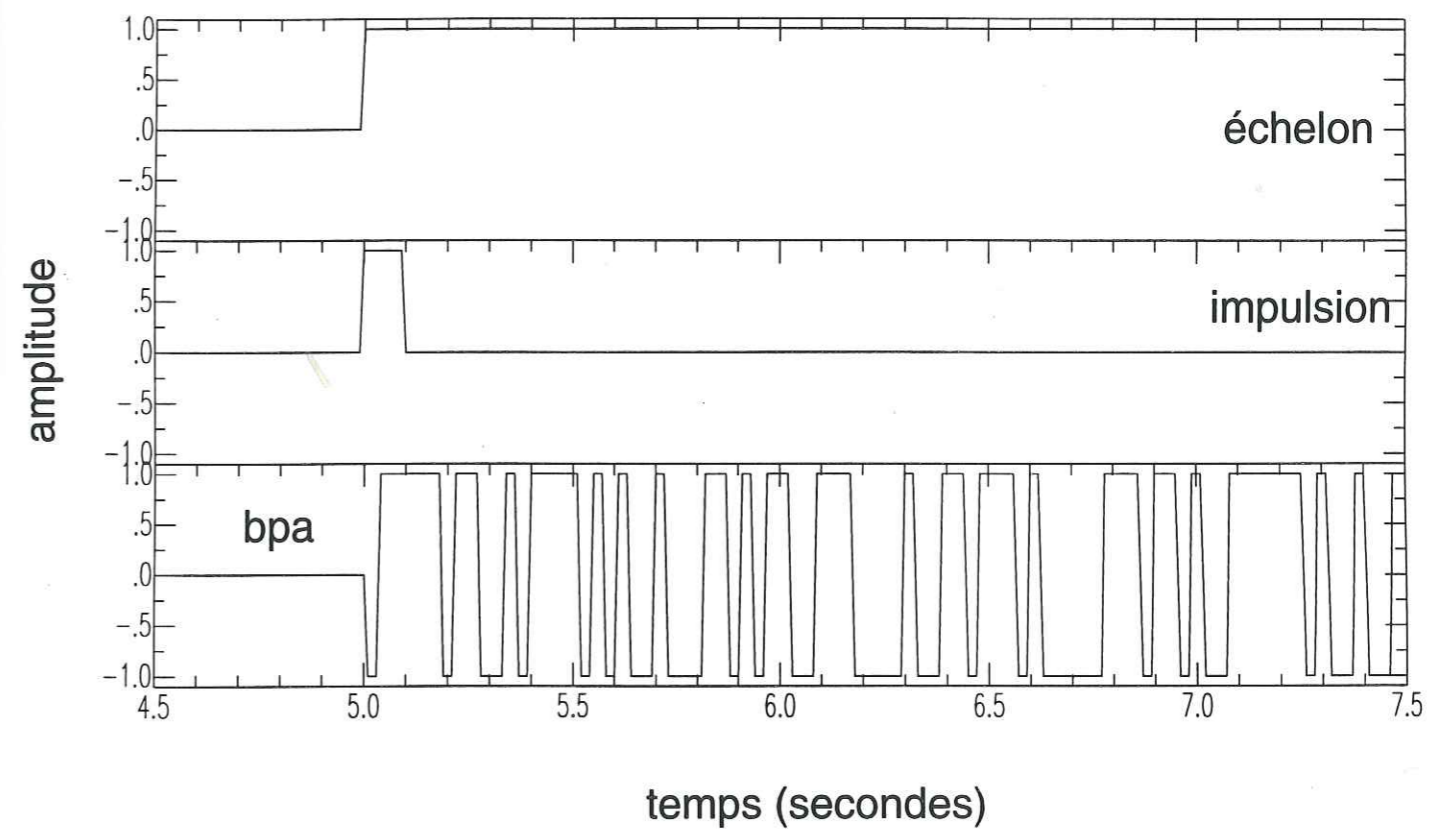


Figure 5.3 - Amplification dans l'échelle du temps de la figure 5.1.

5.3 Détermination du spectre discret de la fonction de transfert - Méthode interspectrale

La réponse au signal de calibration doit être interprétée afin de trouver la fonction de transfert de la station. La méthode choisie utilise l'interspectre des réponses expérimentale et théorique au signal de calibration. La réponse théorique est calculée à partir du modèle analytique de la station qui sera développé dans le paragraphe 5.5. La courbe obtenue, grâce à la méthode interspectrale, est le spectre discret de la fonction de transfert expérimentale. La méthode est présentée dans le diagramme de blocs de la figure 5.4.

On appelle v_c la tension appliquée sur les bornes de la bobine de calibration. Le courant produit par cette tension induit une force sur le pendule du sismomètre. Cette force est proportionnelle à une accélération du sol \ddot{u}_e . q_r est la fonction de transfert du circuit de calibration, qui relie la tension de calibration v_c avec la vitesse du mouvement du sol \dot{u}_e .

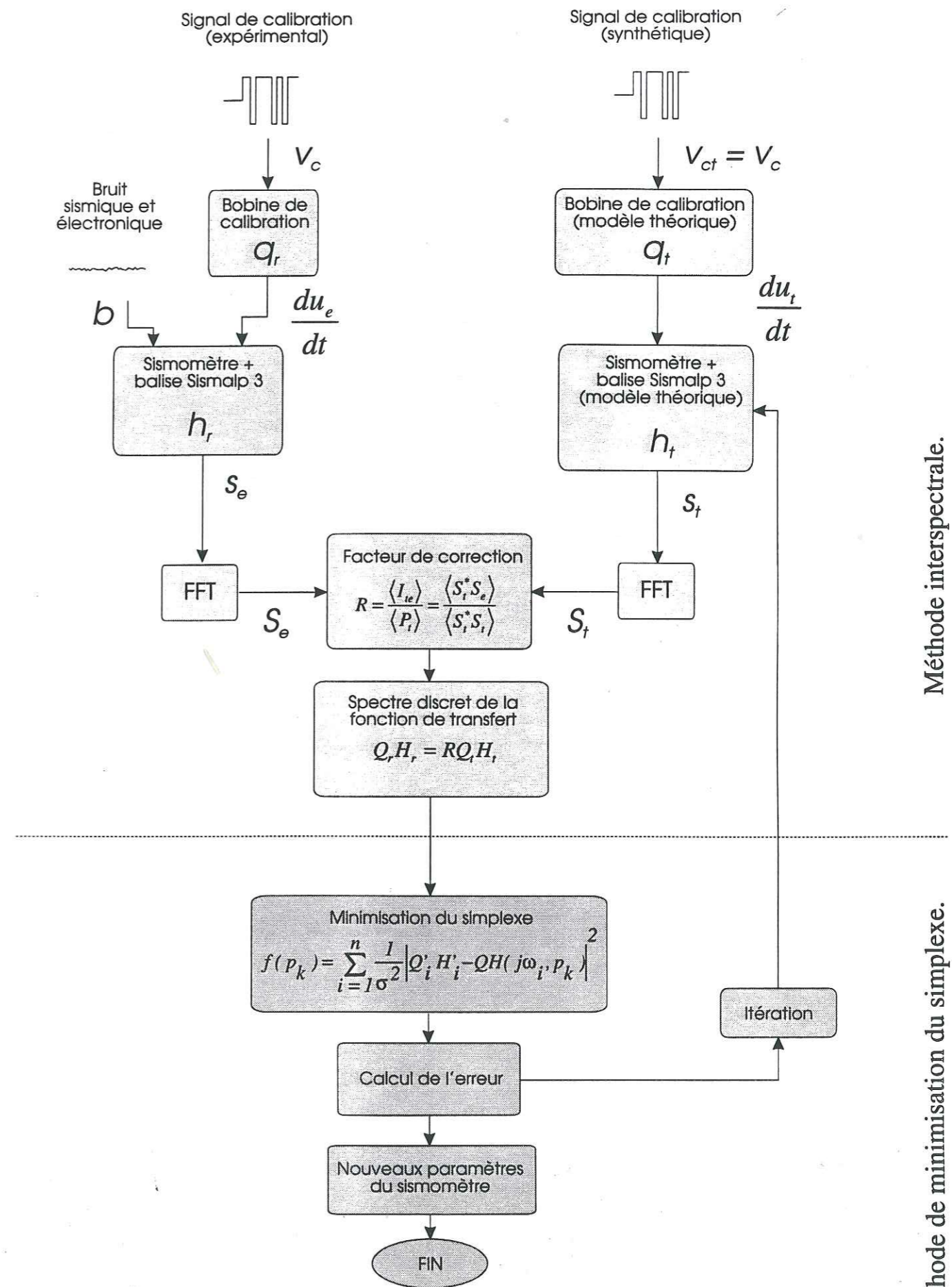
$$\dot{u}_e = v_c q_r \quad (5.4)$$

D'autre part, b est le bruit total qui se superpose au signal \dot{u}_e . Si l'on appelle h_r la fonction de transfert réelle de la station (sismomètre + balise), la sortie expérimentale S_e , dans le domaine de la fréquence, sera égale à

$$S_e = (V Q_r + B) H_r \quad (5.5)$$

Le bruit B a trois sources principales : le bruit sismique, dominant autour de 0.2 Hz et au-dessous de 0.001 Hz, le bruit électronique et le bruit de numérisation. Ces deux derniers sont importants autour de 10 Hz (Fels et Berger, 1994).

Dans le cas idéal où le bruit est absent des enregistrements, les fonctions de transfert de la station et du circuit de calibration peuvent être déterminées en divisant le spectre de sortie par



Méthode interspectrale.

Méthode de minimisation du simplexe.

Figure 5.4 - Méthode de calibration.

le spectre d'entrée. Quand il y a du bruit, une telle procédure introduit du biais. Ce biais peut être réduit en calculant l'interspectre du signal d'entrée, V_c , et du signal de sortie, S_e , et en le divisant par le spectre de puissance du signal d'entrée.

$$Q_r H_r = \frac{V_c^* S_e}{V_c^* V_c} \quad (5.6)$$

Or, l'estimation interspectrale de deux signaux est aussi biaisée s'il y a des délais importants entre les signaux (Jenkins et Watts, 1968). Pour résoudre ce conflit on modifie le signal d'entrée pour qu'il ressemble au signal de sortie. Cette modification consiste à convoluer le signal d'entrée avec la fonction de transfert de la station. Le signal d'entrée modifié devient alors la sortie théorique S_t . L'interspectre peut être calculé maintenant, car les délais entre les signaux ont été réduits. Cette opération est équivalente à un alignement des signaux dans la fréquence.

Berger *et al.* (1979) utilisent comme fonction de transfert la réponse de la station à une impulsion qui est introduite avant l'application du signal de calibration. Steck et Prothero (1989) et Fels et Berger (1994) calculent la fonction de transfert à partir d'un modèle analytique de la station. Nous avons choisi cette dernière alternative, car elle simplifie le processus, en étant aussi fiable.

L'entrée modifiée est donc égale à

$$V_c Q_t H_t = S_t \quad (5.7)$$

Q_t est la fonction de transfert théorique du circuit de calibration. H_t est la fonction de transfert théorique de la station. On calcule Q_t et H_t dans le paragraphe 5.5. Pour calculer S_t on utilise un synthétique du signal de calibration V_c . Ce synthétique peut être considéré identique à la tension de calibration expérimentale. Ceci parce que le facteur b inclut aussi le bruit qui

pourrait les différencier. Dans les calculs qui suivent on utilise donc le terme V_c pour désigner aussi bien l'un comme l'autre.

La formule (5.6) est modifiée et devient un rapport de spectres.

$$R = \frac{S_t^* S_e}{S_t^* S_t} = \frac{I_{te}}{P_t} \quad (5.8)$$

I_{te} est l'interspectre entre la sortie théorique S_t et la sortie expérimentale S_e . Il est égal à

$$\begin{aligned} I_{te} = S_t^* S_e &= (H_t Q_t V_c)^* (H_r Q_r V_c + H_r B) \\ &= (H_t Q_t)^* H_r Q_r |V_c|^2 + (H_t Q_t)^* H_r V_c^* B \end{aligned} \quad (5.9)$$

D'autre part P_t , l'autospectre (ou le spectre de puissance) de la sortie théorique, est égal à

$$P_t = S_t^* S_t = (H_t Q_t V_c)^* H_t Q_t V_c = (H_t Q_t)^* H_t Q_t |V_c|^2 \quad (5.10)$$

Le rapport R est donc égal à

$$R = \frac{I_{te}}{P_t} = \frac{H_r Q_r}{H_t Q_t} + \frac{H_r}{H_t Q_t |V_c|^2} (V_c^* B) \quad (5.11)$$

R a une contribution non désirée due au bruit sismique B . Comme v_c et b ne sont pas corrélés, les estimations de l'interspectre $V_c^* B$ sont statistiquement indépendantes. Le bruit B peut être alors réduit avec une opération de lissage dans le domaine de la fréquence.

Le lissage en fréquence est obtenu grâce à une opération de segmentation dans le temps. Le signal a été découpé en sept segments qui se superposent. Les quatre premiers ont été obtenus en segmentant le signal en quatre morceaux. Les trois derniers ont été obtenus en partant du

milieu du premier segment. L'interspectre I_{te} et l'autospectre P_t sont calculés après sur chaque segment, de façon indépendante. Ensuite, on détermine la moyenne, de l'un et de l'autre, sur l'ensemble de segments.

Ce lissage par segmentation dans le temps est possible, car on peut supposer que le spectre d'un segment quelconque est égal au spectre de l'ensemble (Berger et al., 1979). Ceci, à cause des caractéristiques aléatoires du signal utilisé (signal binaire pseudo-aléatoire).

Après le lissage, le rapport R devient

$$R = \frac{\langle I_{te} \rangle}{\langle P_t \rangle} = \frac{H_r Q_r}{H_t Q_t} + \frac{H_r}{H_t Q_t |V_c|^2} \langle V_c^* B \rangle \quad (5.12)$$

où

$$R = \frac{\langle I_{te} \rangle}{\langle P_t \rangle} = \frac{H_r Q_r}{H_t Q_t} + B_r \quad (5.13)$$

Les fonctions de transfert H_r , Q_r , H_t et Q_t et le signal de calibration V_c restent invariantes dans le processus de lissage. Par contre, l'interspectre $\langle V_c^* B \rangle$ est égal à zéro, car le bruit d'entrée B est statistiquement indépendant du signal de calibration V_c . Cela annule donc le bruit résiduel. Dans la réalité, ceci n'est pas entièrement vrai, car le lissage n'est jamais idéal.

R devient alors le rapport entre les fonctions de transfert réelle et théorique.

$$R = \frac{\langle I_{te} \rangle}{\langle P_t \rangle} = \frac{H_r Q_r}{H_t Q_t} \quad (5.14)$$

R peut être calculé de façon numérique. On obtient alors une courbe discrète qui nous permet de corriger la fonction de transfert théorique pour avoir une estimation de la fonction de transfert réelle.

$$H_r Q_r = R H_t Q_t \quad (5.15)$$

$H_r Q_r$ est le spectre discret de la réponse de la station Sismalp 3 à la tension sur la bobine de calibration.

5.4 Méthode de minimisation du simplexe

On peut s'arrêter à ce stade des calculs et fournir la fonction de transfert de la station comme une courbe discrète dans le domaine des fréquences. Cette alternative a certains inconvénients qui nous ont poussés à chercher une autre solution.

L'utilisation d'une fonction de transfert analytique nous donne accès à certaines avantages que l'on ne peut pas avoir avec une courbe discrète :

- Une fonction de transfert analytique permet un aperçu physique du comportement des stations. Les paramètres sont associés à des composants électroniques ou mécaniques. Leur évolution peut être étudiée et interprétée de façon indépendante.
- En prenant en compte des considérations physiques on peut faire des extrapolations et déduire des informations qui ne sont pas données explicitement par la fonction de transfert.
- On a besoin de moins d'espace mémoire pour stocker la fonction de transfert de la station. Dans le cas du spectre discret on doit garder tous les points de la courbe, dans celui-là il suffit de stocker ces paramètres. Ceci nous permet de manipuler plus facilement la fonction de transfert de plusieurs stations ou leur historique. Avec cette information on peut faire une étude du comportement, en fonction du temps, de la température ou d'autres variables.

- On peut faire des calibrations périodiques et incorporer les paramètres de la dernière calibration dans l'entête des enregistrements.

- Une meilleure précision peut être obtenue. Les paramètres expérimentaux trouvés peuvent être utilisés comme les paramètres théoriques de départ pour une autre application de la méthode interspectrale. Ce processus peut être fait de façon itérative jusqu'à trouver une solution satisfaisante.

Dans le paragraphe 5.5 on construira une expression analytique générale pour toutes les stations. Les paramètres du modèle peuvent être modifiés de façon itérative jusqu'à arriver à la solution qui s'ajuste le mieux au spectre discret de chaque station. Dans ce paragraphe on décrira la méthode de minimisation qui nous permet d'ajuster les paramètres du modèle analytique à la courbe expérimentale du spectre discret.

Nous avons fait une minimisation de moindres carrés de l'expression qui représente la différence entre le spectre discret et le modèle analytique. La fonction à minimiser est

$$f(p_k) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} |\hat{Q}_i \hat{H}_i - QH(j\omega_i, p_k)|^2 \quad (5.16)$$

$\hat{Q}\hat{H}$ est le spectre discret expérimental trouvé avec la méthode interspectrale.

QH est le modèle analytique de la fonction de transfert.

p_k sont les paramètres modifiés à chaque itération k .

k est l'itération en cours.

n est le nombre de points du spectre discret.

σ_i est le facteur de pondération utilisé pour chaque fréquence $j\omega_i$.

La valeur de la fonction f diminue chaque fois que les nouveaux paramètres rapprochent le modèle analytique du spectre discret expérimental. Notre programme utilise la méthode du

simplexe pour diriger l'évolution des paramètres. Cette méthode est relativement nouvelle, elle a été proposée par Nedler et Mead en 1965.

Pour expliquer la méthode du simplexe il faut d'abord construire l'espace de toutes les solutions possibles. Ce espace a $M+1$ dimensions, où M est le nombre de paramètres du modèle. Supposons un modèle qui a une variable dépendante y , qui est une fonction de deux paramètres, a et b . Chaque couple (a, b) définit une valeur unique de la fonction de minimisation, f . L'espace de toutes les solutions possibles est donc la surface qui regroupe toutes les valeurs de f . Cette surface évolue dans un milieu tridimensionnel. La minimisation a comme objectif la recherche du minimum de cette surface. La figure 5.5 représente l'espace de toutes les solutions possibles de notre exemple.

Le simplexe est une figure géométrique qui a M dimensions et $M+1$ sommets. Dans ce cas, le simplexe est un triangle. Ce triangle est placé sur la surface des solutions. Chaque sommet est défini par les coordonnées (a, b, f) . Pour trouver la valeur minimum de la surface, l'algorithme déplace le simplexe vers la solution, en l'accéléralant ou en le retardant si nécessaire.

La règle qui détermine ce mouvement est simple. On détermine d'abord le sommet qui a la valeur de f la plus élevée (le pire sommet). On détermine après le sommet qui a la valeur de f la plus basse (le meilleur sommet). On rejette alors le sommet le plus haut et on le substitue par un autre de meilleures caractéristiques. L'algorithme calcule le nouveau sommet en suivant l'un de ces quatre mécanismes: réflexion, expansion, contraction ou rétrécissement.

La figure 5.6 montre le simplexe que l'on a décrit et les mécanismes possibles pour trouver un nouveau sommet. Le simplexe est le triangle BOW . Le sommet W est le pire sommet, le meilleur est le sommet B . L'algorithme du simplexe est présenté ci-dessous.

a). On teste d'abord le sommet R , trouvé par réflexion. Si ce sommet n'est pas pire que le sommet W , ni meilleur que le sommet B , il est accepté et l'itération se termine ici.

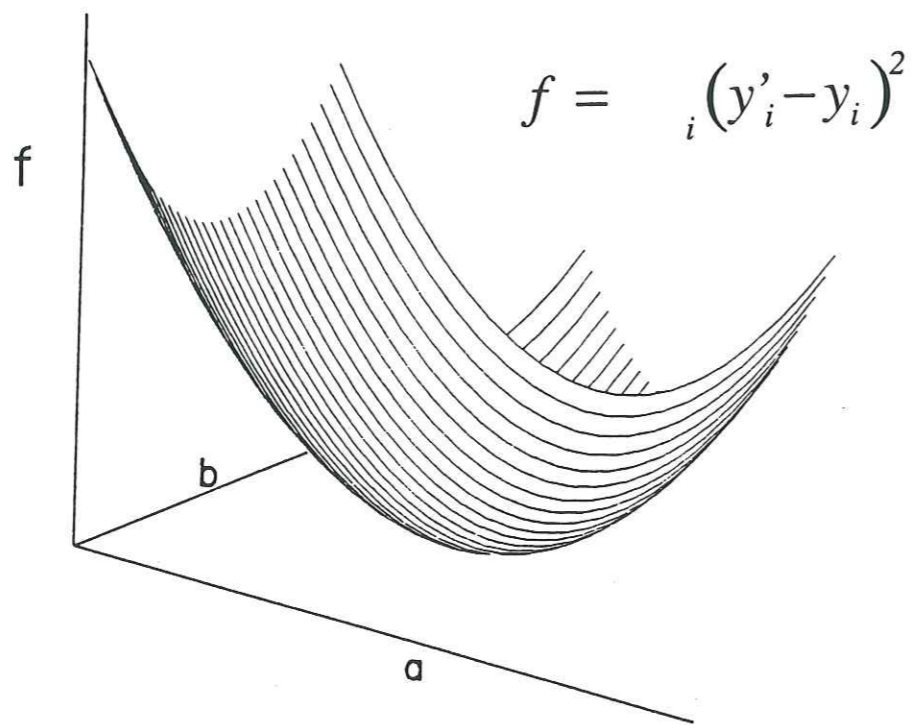


Figure 5.5 - Méthode du simplexe.

Espace de toutes les solutions possibles.

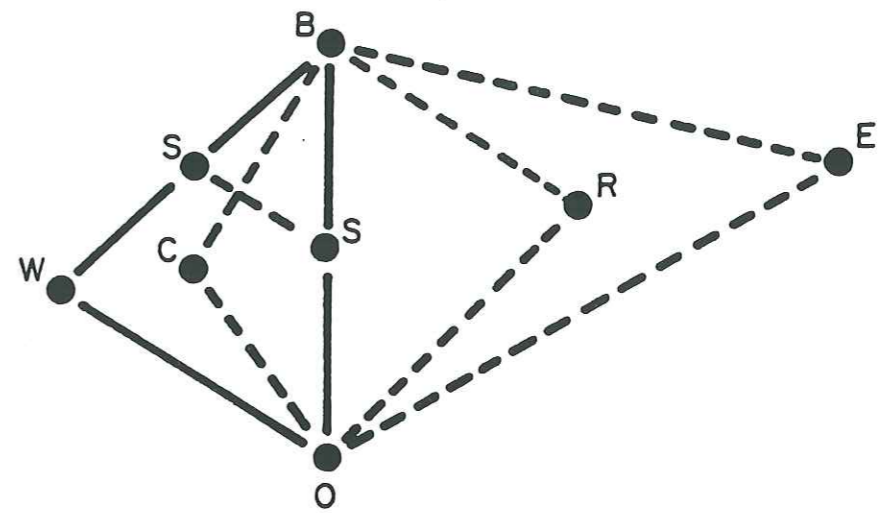


Figure 5.6 - Méthode du simplexe.

Mécanismes utilisés pour la détermination des nouveaux sommets.

- b). Si le sommet R est meilleur que le sommet B , on est dans la bonne direction. On essaye alors une expansion, en suivant le même mouvement de réflexion, mais en parcourant le double de la distance. Le sommet par expansion E est accepté s'il a une meilleure valeur que le sommet par réflexion R . Si ce n'est pas le cas on garde le sommet R .
- c). Si le sommet R est pire que le sommet W , on est dans la mauvaise direction. On teste alors une contraction C . Si le sommet C est meilleur que le sommet R , il est accepté et le processus se termine.
- d). Si ce n'est pas le cas, l'algorithme essaye la dernière alternative, qui consiste à faire un rétrécissement de tous les sommets, sauf du sommet B . On arrive donc aux sommets S .

Les avantages de la méthode du simplexe par rapport à d'autres méthodes sont énumérés ci-dessous :

- La divergence est impossible.
- La réponse doit être calculée une seule fois, ou au moins, quelques fois, à chaque itération.
- On n'utilise pas des différentiations numériques. Ceci évite des erreurs d'arrondissement et permet la manipulation de fonctions discontinues.
- On ne fait pas des manipulations matricielles.

Le choix des critères de convergence est une affaire délicate quand il s'agit de méthodes multidimensionnelles de minimisation. Avec plusieurs variables indépendantes, on n'a pas le droit de demander une certaine tolérance pour l'une d'elles. Le programme utilisé (Press et al., 1986) compare la différence relative entre deux valeurs successives de la fonction de minimisation. Le critère est donc :

$$rtol = 2 \frac{|f_k - f_{k-1}|}{|f_k + f_{k-1}|} \quad (5.17)$$

Quand cette valeur descend au-dessous d'un seuil de tolérance $ftol$, on dit que la convergence a été atteinte.

Une fois que les nouveaux paramètres ont été déterminés, ils peuvent être utilisés comme des paramètres de départ pour une nouvelle application de la méthode interspectrale. Ceci est illustré dans la figure 5.4.

5.5 Fonction de transfert analytique

Dans le paragraphe 5.3 on a décrit une méthode pour déterminer le spectre discret de la fonction de transfert de la station. Dans le paragraphe 5.4 on a présenté la procédure de minimisation utilisée pour ajuster une expression analytique à ce spectre discret. Dans ce paragraphe on montre la démarche suivie pour la construction de la fonction de transfert analytique.

On utilise l'expression « station Sismalp 3 » pour désigner un ensemble constitué de deux parties indépendantes : le sismomètre trois composantes et la balise Sismalp 3. La balise peut être divisée en deux parties pour son étude : l'électronique de conditionnement du signal (étage analogique) et le convertisseur analogique numérique.

Une station Sismalp 3 est donc représentée par trois blocs :

- le sismomètre amorti,
- l'électronique de conditionnement du signal,
- le convertisseur analogique numérique.

5.5.1 Le sismomètre amorti

Notre sismomètre trois composantes est un assemblage construit à partir d'un sismomètre vertical et deux sismomètres horizontaux. Les trois capteurs sont de période courte, Mark Products, modèle L4C, avec une fréquence naturelle égale à 1 Hz. Sachant qu'ils ont des caractéristiques similaires on ne considérera que l'un d'eux pour la construction du modèle théorique. Les sismomètres choisis ont une résistance nominale de bobine de signal égale à 5500 ohms.

Ces sismomètres sont fournies d'une bobine de calibration. Elle a été utilisée pour l'étalonnage de la station. Une tension sur les bornes de la bobine produit une force sur le pendule qui est proportionnelle à une accélération du sol. Dans ce paragraphe on déduira d'abord la fonction de transfert du sismomètre amorti et ensuite celle de la bobine de calibration.

a). Le sismomètre amorti

Le constructeur fournit une courbe sur une échelle logarithmique entre 0.4 et 20 Hz (fig. 5.7). Cette courbe montre la fonction de transfert en vitesse dans le domaine de la fréquence, en volts/pouce/seconde. Il s'agit de la réponse du capteur à la vitesse du sol. On peut voir que la courbe correspond à celle d'un système amorti de deuxième ordre. Pour modifier l'amortissement on doit connecter une résistance en parallèle avec la bobine de signal. Sans résistance d'amortissement le sismomètre aura un pic de résonance autour de sa fréquence naturelle, 1 Hz.

On ne peut pas utiliser cette courbe pour connaître les paramètres du capteur. Il s'agit seulement d'un instrument graphique pour avoir un aperçu approximatif de la réponse.

Aki et Richards (1980) donnent l'équation différentielle qui décrit le comportement d'un sismographe standard. Dans leur modèle, le sismomètre est connecté à un galvanomètre, dans le notre, il est connecté à la balise Sismalp 3. La balise présente, à l'entrée, une résistance d'amortissement en parallèle avec l'impédance d'entrée d'un amplificateur opérationnel.

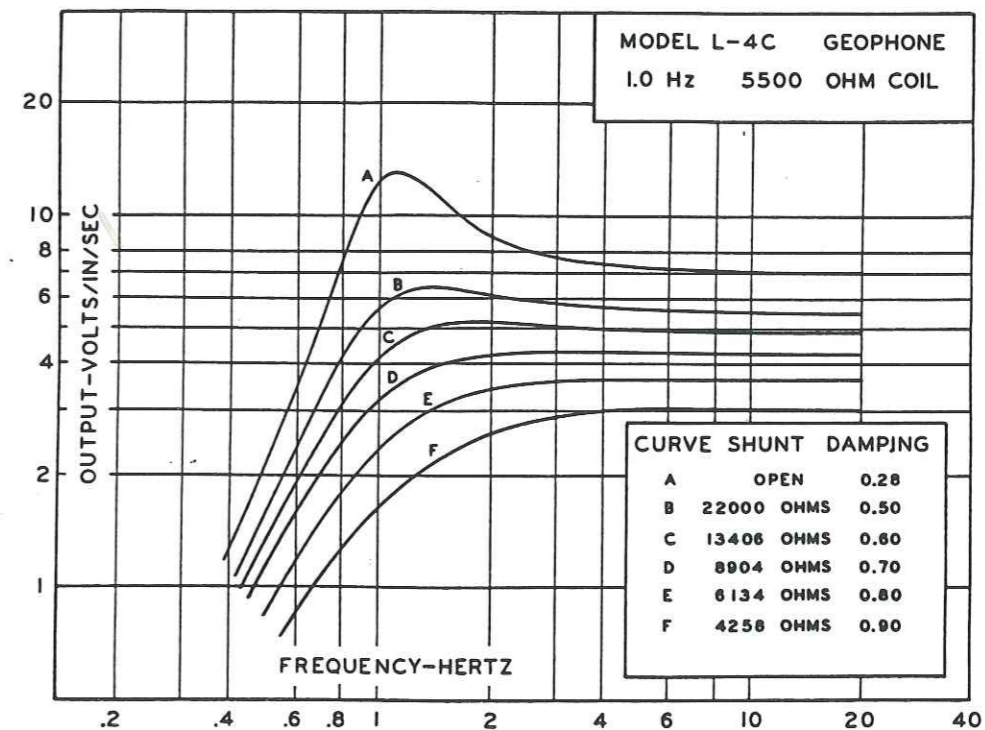


Figure 5.7 - Réponse à la vitesse du mouvement du sol.

Courbe fournie par Mark Products.

L'impédance d'entrée de l'amplificateur est très élevée, on peut donc la négliger. On ne considérera que la résistance d'amortissement. La figure 5.8 montre un schéma du sismomètre. A gauche on peut apprécier la bobine de calibration, à droite la bobine de signal et au milieu une représentation symbolique de la partie mécanique du sismomètre, c'est à dire le système à pendule et ressort. L'équation différentielle de ce système est

$$M \frac{d^2}{dt^2} [x(t) + u(t)] + D \frac{dx(t)}{dt} + K[x(t) - x_0] = -Gi_s \quad (5.18)$$

- M : masse du pendule.
- $x(t)$: mouvement du pendule.
- $u(t)$: mouvement du sol.
- x_0 : point de repos du pendule.
- D : constante de proportionnalité de l'amortissement mécanique.
- K : constante de proportionnalité du ressort.
- G : constante de transduction.
- i_s : courant qui circule à travers la bobine de signal.

Le mouvement du pendule, x , est affecté par une force de contre réaction $-Gi_s$. G est la constante de transduction ou constante électrodynamique du sismomètre.

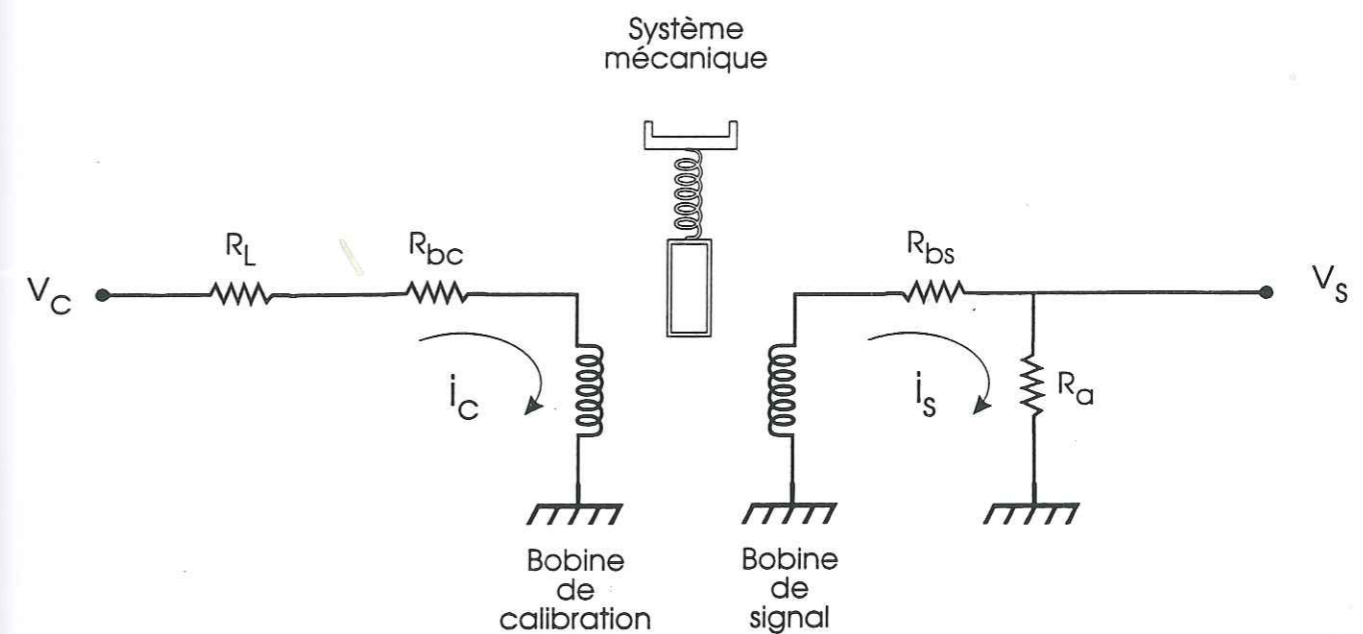
On réécrit $x(t) - x_0 = x(t)$. L'équation différentielle devient :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\varepsilon_0 \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\frac{d^2 u}{dt^2} - \frac{Gi_s}{M} \quad (5.19)$$

avec

$$2\varepsilon_0 = \frac{D}{M} \quad : \text{la constante d'amortissement mécanique.}$$

$$\omega_0^2 = \frac{K}{M} \quad : \text{le carré de la vitesse angulaire naturelle.}$$



v_C : tension de calibration

v_S : tension de sortie

i_C : courant de calibration

i_s : courant de sortie

R_L : résistance pour limiter le courant de calibration

R_{bc} : résistance de la bobine de calibration

R_{bs} : résistance de la bobine de signal

R_a : résistance d'amortissement

Figure 5.8 - Schéma du sismomètre.

On peut exprimer le courant dans la bobine de signal en fonction de la constante de transduction G .

$$i_s = \frac{v_g}{R_{bs} + R_a} = \frac{G \frac{dx}{dt}}{R_{bs} + R_a} \quad (5.20)$$

On remplace cette expression dans l'équation (5.19)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(2\varepsilon_0 + \frac{G^2}{(R_{bs} + R_a)M} \right) \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\frac{d^2u}{dt^2} \quad (5.21)$$

qui peut aussi s'exprimer comme

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\frac{d^2u}{dt^2} \quad (5.22)$$

2ε représente l'amortissement total du système.

$2\varepsilon_0$ est l'amortissement mécanique.

$\frac{G^2}{(R_{bs} + R_a)M}$ est l'amortissement électrique dû à la résistance de la bobine du signal et à la résistance d'amortissement.

Si l'on applique la transformée de Fourier on a

$$(j\omega)^2 X - 2\varepsilon(j\omega)X + \omega_0^2 X = -(j\omega)^2 U \quad (5.23)$$

Le rapport entre le mouvement du pendule et le mouvement du sol est

$$\frac{X}{U} = \frac{-(j\omega)^2}{(j\omega)^2 - 2\varepsilon(j\omega) + \omega_0^2} \quad (5.24)$$

Maintenant on veut trouver le rapport entre la tension fournie par le capteur et le mouvement du sol. La force électromotrice sur les bornes de la bobine est

$$v_g = G \frac{dx}{dt} \quad (5.25)$$

On applique la transformée de Fourier

$$V_g = -j\omega G X \quad (5.26)$$

On remplace X dans l'équation (5.24)

$$\frac{V_g}{U} = G \frac{(j\omega)^3}{(j\omega)^2 - 2\varepsilon(j\omega) + \omega_0^2} \quad (5.27)$$

La tension à la sortie du capteur est

$$V_s = V_g \frac{R_a}{R_a + R_{bs}} \quad (5.28)$$

On remplace V_g dans l'équation (5.27)

$$\frac{V_s}{U} = G \frac{R_a}{R_a + R_{bs}} \frac{(j\omega)^3}{(j\omega)^2 - 2\varepsilon(j\omega) + \omega_0^2} \quad (5.29)$$

Cette expression exprime la tension à la sortie du sismomètre en fonction du mouvement du sol. Si l'on veut trouver la fonction de transfert pour la vitesse du sol, il faut dériver une fois le mouvement du sol u . Une dérivation dans le temps est équivalente à une multiplication par $-j\omega$, dans le domaine de la fréquence. On utilisera cette expression comme la fonction de transfert du sismomètre $H_1(\omega)$.

$$H_1(\omega) = \frac{V_s}{\dot{U}} = -G \frac{R_a}{R_a + R_{bs}} \frac{(j\omega)^2}{(j\omega)^2 - 2\epsilon(j\omega) + \omega_0^2} \frac{\text{volts}}{\text{m/sec}} \quad (5.30)$$

La figure 5.9 nous montre les courbes des réponses en amplitude et en phase issues de cette fonction de transfert. On peut retrouver la courbe fournie par Mark Products (figure 5.7) dans la courbe de réponse en amplitude.

Pour avoir la fonction de transfert pour l'accélération du sol il faut dériver deux fois.

$$\frac{V_s}{\ddot{U}} = G \frac{R_a}{R_a + R_{bs}} \frac{(j\omega)}{(j\omega)^2 - 2\epsilon(j\omega) + \omega_0^2} \frac{\text{volts}}{\text{m/sec}^2} \quad (5.31)$$

b). La bobine de calibration

Une opération de calibration consiste à appliquer une tension sur la bobine de calibration du sismomètre pour simuler un mouvement du sol. Le courant de calibration induit une force sur le pendule, qui est proportionnelle à une accélération du sol. La constante de proportionnalité entre cette force et le courant de calibration s'appelle « constante de calibration ». Elle est fournie par le fabricant. L'accélération du sol est égale à

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{i_c C_c}{M} = \frac{v_c C_c}{(R_l + R_{bc})M} \quad (5.32)$$

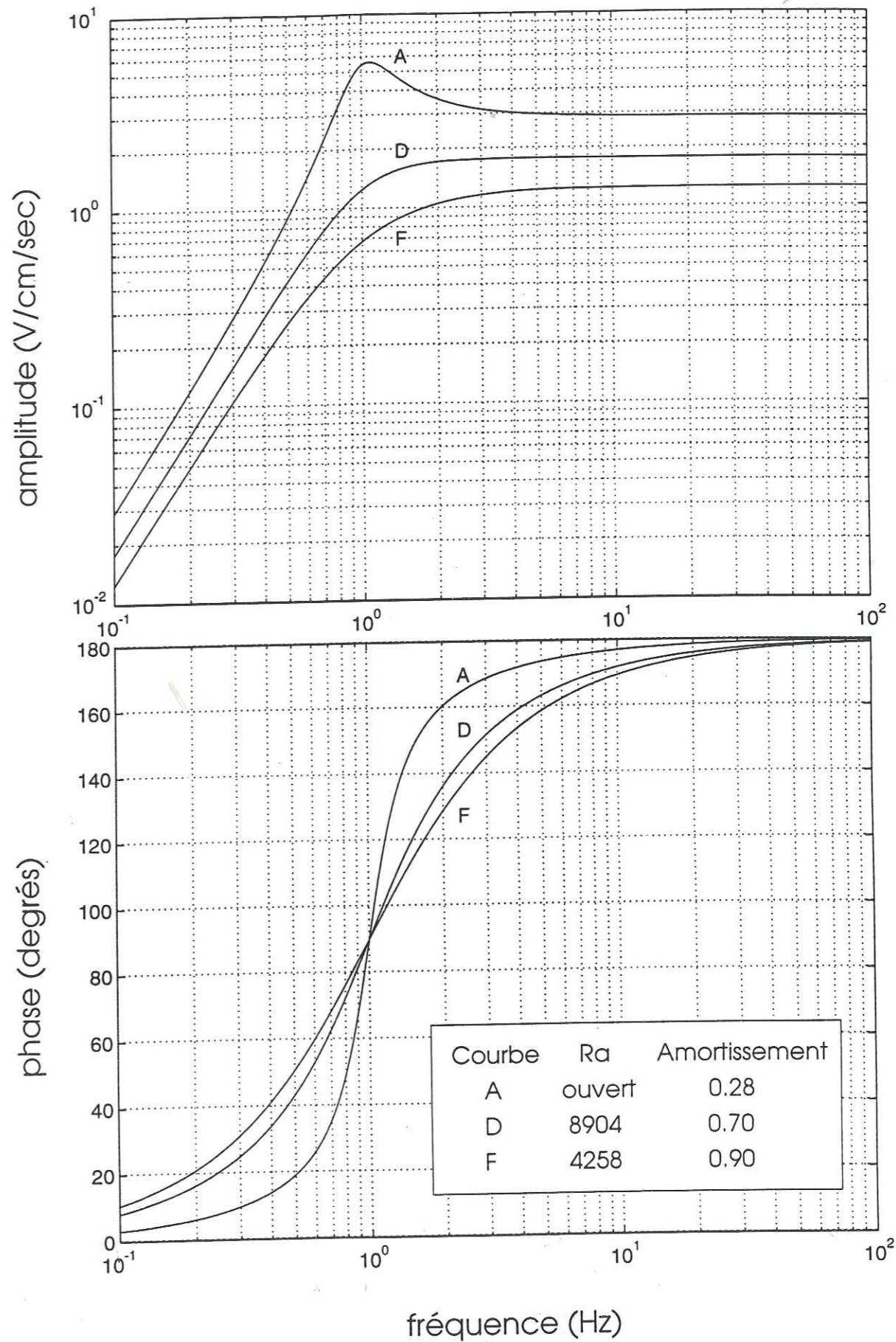


Figure 5.9 - Réponse à la vitesse du mouvement du sol. Fonction de transfert analytique $H_1(\omega)$. Sismomètre amorti.

On applique la transformée de Fourier

$$\ddot{U} = \frac{V C_c}{M(R_l + R_{bc})} \quad (5.33)$$

On retrouve ainsi la fonction de transfert de la bobine de calibration qui relie la tension de calibration avec la vitesse du mouvement du sol, $Q(\omega)$ (cf. paragraphe 5.3).

$$Q(\omega) = \frac{\dot{U}}{V_c} = \frac{C_c}{M(R_l + R_{bc})(-j\omega)} \frac{m/sec}{volts} \quad (5.34)$$

Si l'on multiplie Q par l'équation (5.30) on obtient la fonction de transfert qui relie la tension à la sortie du sismomètre V_s avec la tension de calibration V_c .

$$\frac{V_s}{V_c} = Q(\omega)H(\omega) \quad (5.35)$$

$$\frac{V_s}{V_c} = \frac{C_c}{M(R_l + R_{bc})} \frac{GR_a}{(R_a + R_{bs})} \frac{(j\omega)}{(j\omega)^2 - 2\varepsilon(j\omega) + \omega_0^2} \quad (5.36)$$

$$\frac{V_s}{V_c} = A_v \frac{(j\omega)}{(j\omega)^2 - 2\varepsilon(j\omega) + \omega_0^2} \quad (5.37)$$

avec $A_v = \frac{GC_c}{M} \frac{R_a}{(R_a + R_{bs})(R_l + R_{bc})}$

Le circuit de calibration introduit un effet d'intégration dans la courbe de la figure 5.9. Dans la figure 5.10 on peut apprécier la réponse du sismomètre à la tension de calibration.

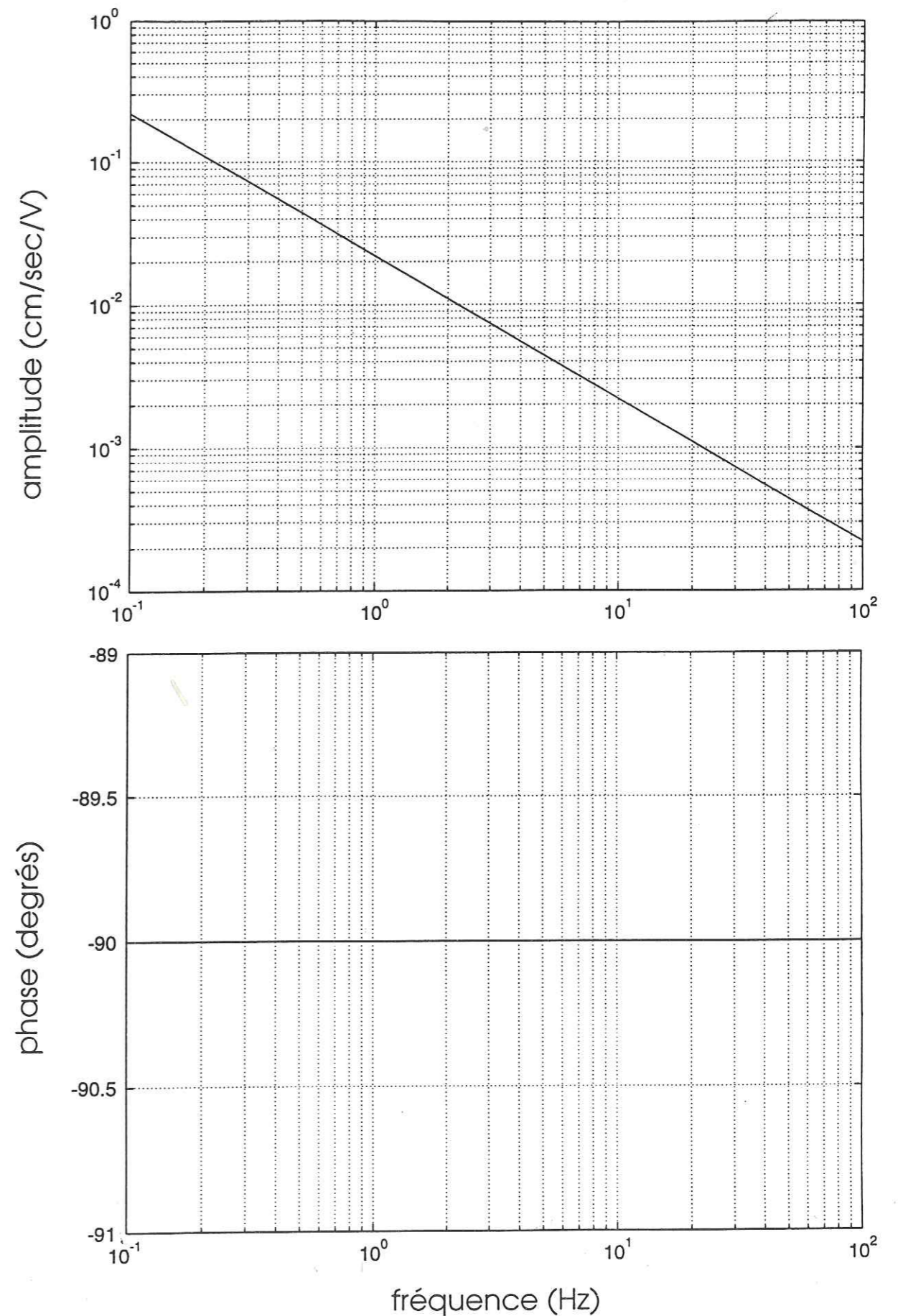


Figure 5.10 - Réponse à la tension de calibration.
Fonction de transfert analytique $Q(\omega)$.
Bobine de calibration.

5.5.2 L'électronique de conditionnement du signal

La sortie du sismomètre doit être conditionnée avant d'être envoyée sur le convertisseur a/n. D'abord, le signal doit être amplifié pour le ramener au niveaux requis par le convertisseur. Ensuite, on doit appliquer un filtrage passe-bas pour éviter le phénomène de repliement ou « aliasing » (théorème de Shannon). La figure 5.11 montre les circuits analogiques qui s'occupent de ces deux tâches.

La résistance d'amortissement se trouve physiquement sur la carte d'acquisition de la station Sismalp 3. Or, on la considère comme faisant partie du sismomètre, car elle est responsable, avec la résistance de la bobine de signal, de l'amortissement électrique du système de deuxième ordre qui représente le capteur.

a). Fonction de transfert de l'amplificateur

L'étape d'amplification est mise en oeuvre par un amplificateur opérationnel. Le gain peut être modifié pour permettre l'utilisation de plusieurs types de capteurs, avec des différentes constantes électrodynamiques. Il est égal à

$$K = \frac{R_2}{R_1} \quad (5.38)$$

Grâce aux caractéristiques de l'amplificateur opérationnel choisi, le circuit d'amplification n'introduit pas de distorsion de phase. Son impédance d'entrée est très élevée et son impédance de sortie est égale à zéro. La fonction de transfert de l'amplificateur est donc égale à

$$H_{21}(\omega) = K \quad (5.39)$$

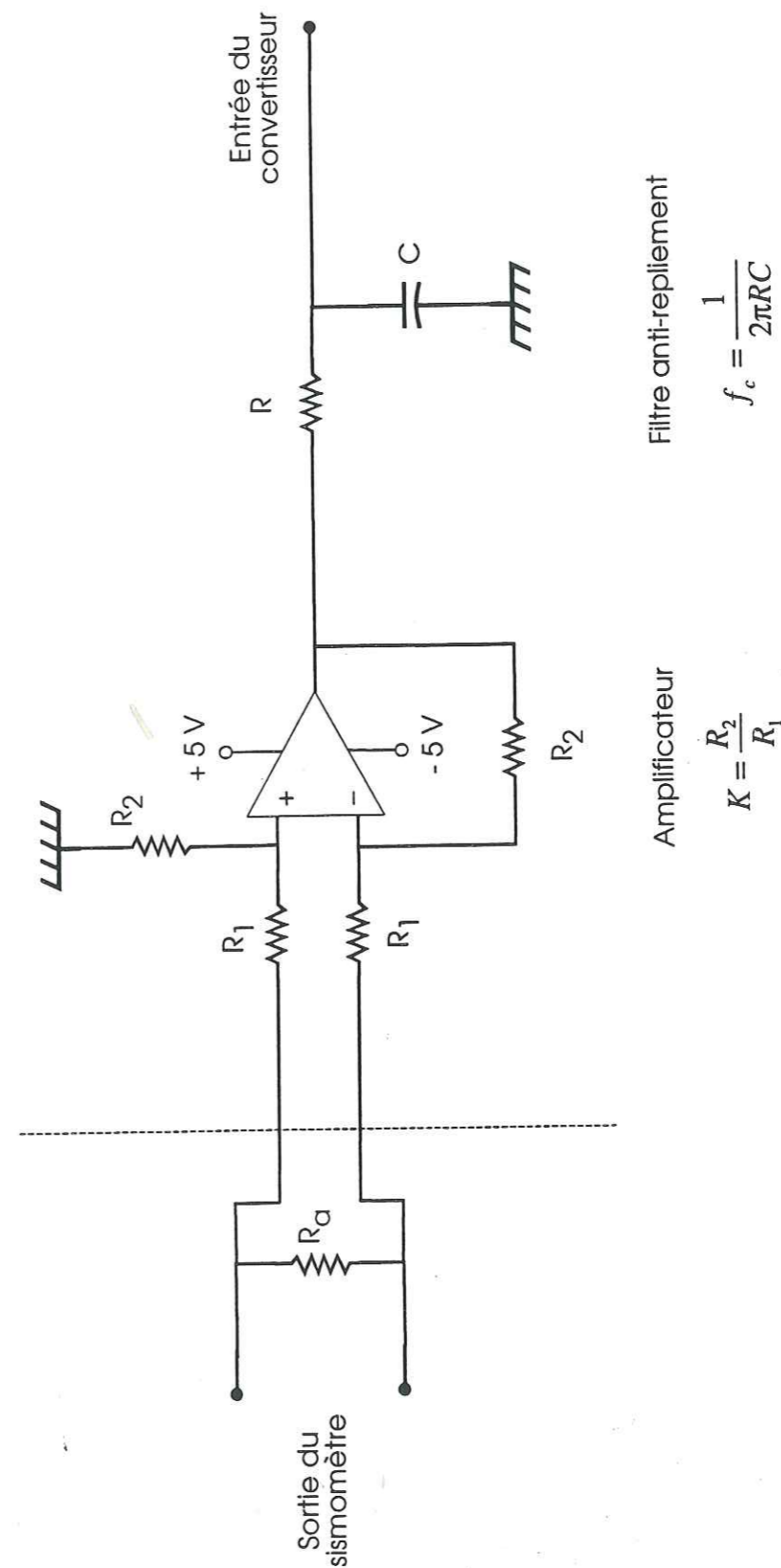


Figure 5.11 - Schéma fonctionnel de l'électronique de conditionnement du signal.

b). Fonction de transfert du filtre anti-repliement

Le théorème de Nyquist affirme que si l'on a un signal $x(t)$, avec un spectre limité en fréquence

$$X(f) = 0 \quad \text{pour } |f| > f_N \quad (5.40)$$

on peut le représenter par une suite

$$x[n] = x(nT) \quad \text{avec } n = 0, 1, 2, 3... \quad (5.41)$$

si

$$f_{\text{éch}} = \frac{1}{T} > 2f_N \quad (5.42)$$

La fréquence f_N est connue comme fréquence de Nyquist. Evidemment, ce genre de signal n'existe pas dans la réalité. Il faut donc appliquer un filtrage pour limiter la bande du signal, avant de faire l'échantillonnage. Ce filtre est connu comme filtre anti-repliement ou filtre anti-aliasing.

Le convertisseur de la station, le AD7712, sur échantillonne le signal à une fréquence f_{se} égale à 19200 Hz (cette fréquence varie en fonction du gain programmable utilisé, cf. paragraphe 5.5.3). Ensuite, il applique un filtrage passe-bas numérique avant de faire une décimation. La fréquence du signal de sortie peut varier entre 10 et 1010.5 Hz.

Le filtre numérique du convertisseur pourrait suffire pour les besoins de filtrage anti-repliement. Or, le spectre de la réponse d'un filtre numérique se répète autour des multiples entiers de la fréquence d'échantillonnage (sur échantillonnage, dans ce cas). Ceci veut dire que les bruits qui se trouvent près des fréquences multiples de f_{se} (19200 Hz, 38400 Hz, 57600 Hz, ...) ne seront pas filtrés et se replieront à l'intérieur de la bande de signal. Ce genre de bruit doit être filtré avant que le signal soit sur échantillonné. Comme le rapport entre la

fréquence f_{se} (19200 Hz) et la fréquence maximum de sortie (1010.5 Hz) est important, un filtre RC d'un pôle suffit pour accomplir cette tâche (Analog Devices, 1994, Crystal Semiconductors, 1992).

La fonction de transfert de ce filtre est égale à

$$H_{22}(\omega) = \frac{\frac{1}{RC}}{j\omega + \frac{1}{RC}} \quad (5.43)$$

ou

$$H_{22}(\omega) = \frac{A_2}{j\omega - p_3} \quad (5.44)$$

avec

$$A_2 = \frac{1}{RC}, \quad p_3 = -\frac{1}{RC}, \quad R = 10 \text{ k}\Omega, \quad C = 5,6 \text{ nF}$$

La fréquence de coupure à -3 dB est égale à

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 2842 \text{ Hz} \quad (5.45)$$

Le tableau ci-dessous présente l'atténuation du filtre aux fréquences multiples de la fréquence de sur échantillonnage.

n	f	$ H_{22}(\omega) $
1	19200	0.146
2	38400	0.074
3	57600	0.049
4	76800	0.037

Tableau 5.1 - Atténuation des fréquences multiples de f_{se} .

c). *Fonction de transfert de l'ensemble*

La fonction de transfert de l'électronique de conditionnement du signal est donc égale à

$$H_2(\omega) = H_{21}(\omega)H_{22}(\omega) = K \frac{A_2}{j\omega - p_3} \quad (5.46)$$

La courbe issue de cette expression est présentée dans la figure 5.12.

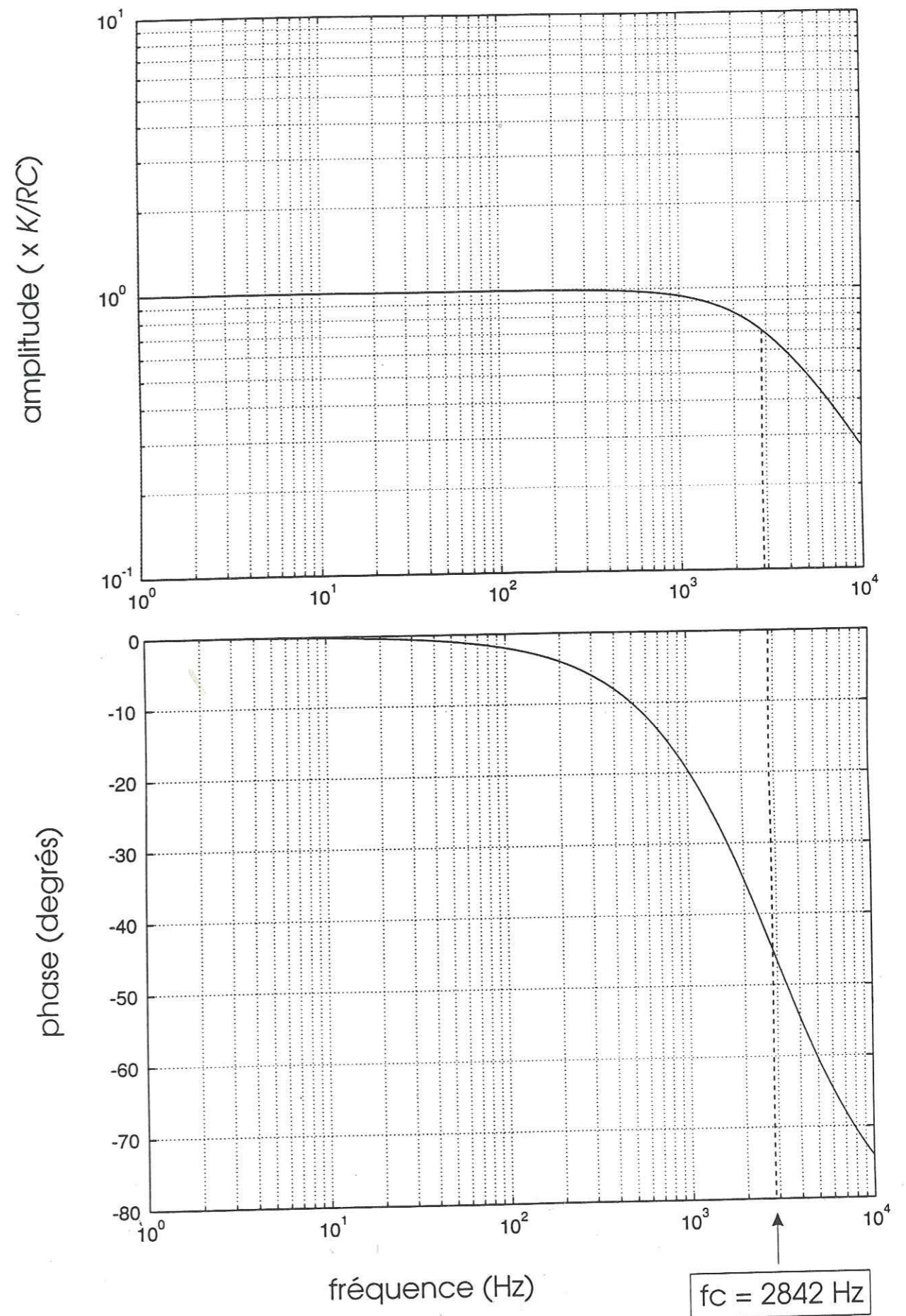


Figure 5.12 - Fonction de transfert analytique $H_2(w)$.
Electronique de conditionnement du signal.
Gain = K/RC .

5.5.3 Le convertisseur sigma-delta

La carte d'acquisition de la balise Sismalp 3 est construite autour du convertisseur sigma-delta AD7712, fabriqué par Analog Devices. Les convertisseurs sigma-delta utilisent des techniques de sur échantillonnage, de filtrage numérique et de décimation pour accomplir des conversions a/n de grande dynamique et de faible coût. La qualité d'un convertisseur sigma-delta est définie par son rapport de sur échantillonnage et par les caractéristiques de son filtre numérique.

La fréquence de sur échantillonnage est une fonction du gain programmable du convertisseur. Le tableau ci-dessous montre cette dépendance.

Gain programmable	fse
1	19200
2	38400
4	76800
8	153600
16	153600

32	153600
64	153600
128	153600

Tableau 5.2 - Fréquence de sur échantillonnage et gain programmable.

a). Le filtre numérique

Le filtre numérique du convertisseur AD7712 est un filtre passe-bas Arma de trois pôles, qui introduit une distorsion de phase linéaire. Un filtre Arma est la combinaison d'un filtre récursif AR (autorégressif) et d'un filtre non récursif MA (« moving average » ou moyenne glissante). Le fabricant fournit la réponse du filtre dans le domaine z (Analog Devices, communication personnelle)

$$H_3(z) = \left(\frac{1}{N} \left(\frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \right) \right)^3 \quad (5.47)$$

N est le code de sélection du filtre. Ce code a un format de 12 bits et détermine la fréquence de coupure du filtre, la position de son premier noeud et la fréquence d'acquisition. N peut avoir des valeurs entre 19 et 1920.

La fréquence d'acquisition est égale à:

$$f_{acq} = \frac{\left(\frac{f_{CLK}}{512}\right)}{N} = \frac{19200}{N} \quad (5.48)$$

avec $f_{CLK} = 9830400 \text{ Hz}$

f_{CLK} est la fréquence d'opération de l'horloge de la carte CPU de la station Sismalp 3.

La position du premier noeud du filtre est égale à la fréquence d'acquisition. La fréquence de coupure du filtre à -3 dB est égale à

$$f_c = 0.262 f_{acq} \quad (5.49)$$

Dans le tableau 5.3 on présente les valeurs de la fréquence d'acquisition, du premier noeud et de la fréquence de coupure pour trois valeurs de N .

N	Fréquence d'acquisition (Hz)	Premier noeud (Hz)	Fréquence de coupure (Hz)
1920	10	10	2.62
192	100	100	26.2
19	1010.5	1010.5	264.8

Tableau 5.3 - Filtre numérique du convertisseur AD7712

Pour avoir une idée de la distorsion introduite par le filtre numérique du convertisseur il faut exprimer sa fonction de transfert dans le domaine des fréquences. Pour cela on doit faire un changement de variable

$$z = \exp(j\omega p) \quad (5.50)$$

où p est le pas de sur échantillonnage utilisé.

La fonction de transfert du filtre numérique ne peut pas être exprimée de façon paramétrique, comme une équation avec des pôles et des zéros. On obtient plutôt

$$H_3(\omega) = \left(\frac{1}{N} \frac{\sin^2\left(\frac{N\omega p}{2}\right) + j \sin\left(\frac{N\omega p}{2}\right) \cos\left(\frac{N\omega p}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\omega p}{2}\right) + j \sin\left(\frac{\omega p}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega p}{2}\right)} \right)^3 \quad (5.51)$$

La réponse en amplitude est égale à

$$|H_3(\omega)| = \left(\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N\omega p}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega p}{2}\right)} \right)^3 \quad (5.52)$$

ou

$$|H_3(f)| = \left(\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N\pi f}{f_{se}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi f}{f_{se}}\right)} \right)^3 \quad (5.53)$$

f_{se} est la fréquence de sur échantillonnage. Dans la figure 5.13 on montre la réponse en amplitude et en phase du filtre pour plusieurs valeurs de N (et donc pour plusieurs fréquences d'acquisition). La figure 5.14 montre la linéarité de la réponse en phase du filtre. Le délai de groupe introduit par le filtre est constant et égal à la pente de la courbe.

On peut aussi exprimer le filtre dans le domaine du temps. On obtient ainsi une composition de deux filtres en parallèle qui agit sur la séquence d'échantillons dans le temps.

$$y(k) = \frac{[x(k) - 3x(k-N) + 3x(k-2N) - x(k-3N)]}{N^3} + [3y(k-1) - 3y(k-2) + y(k-3)] \quad (5.54)$$

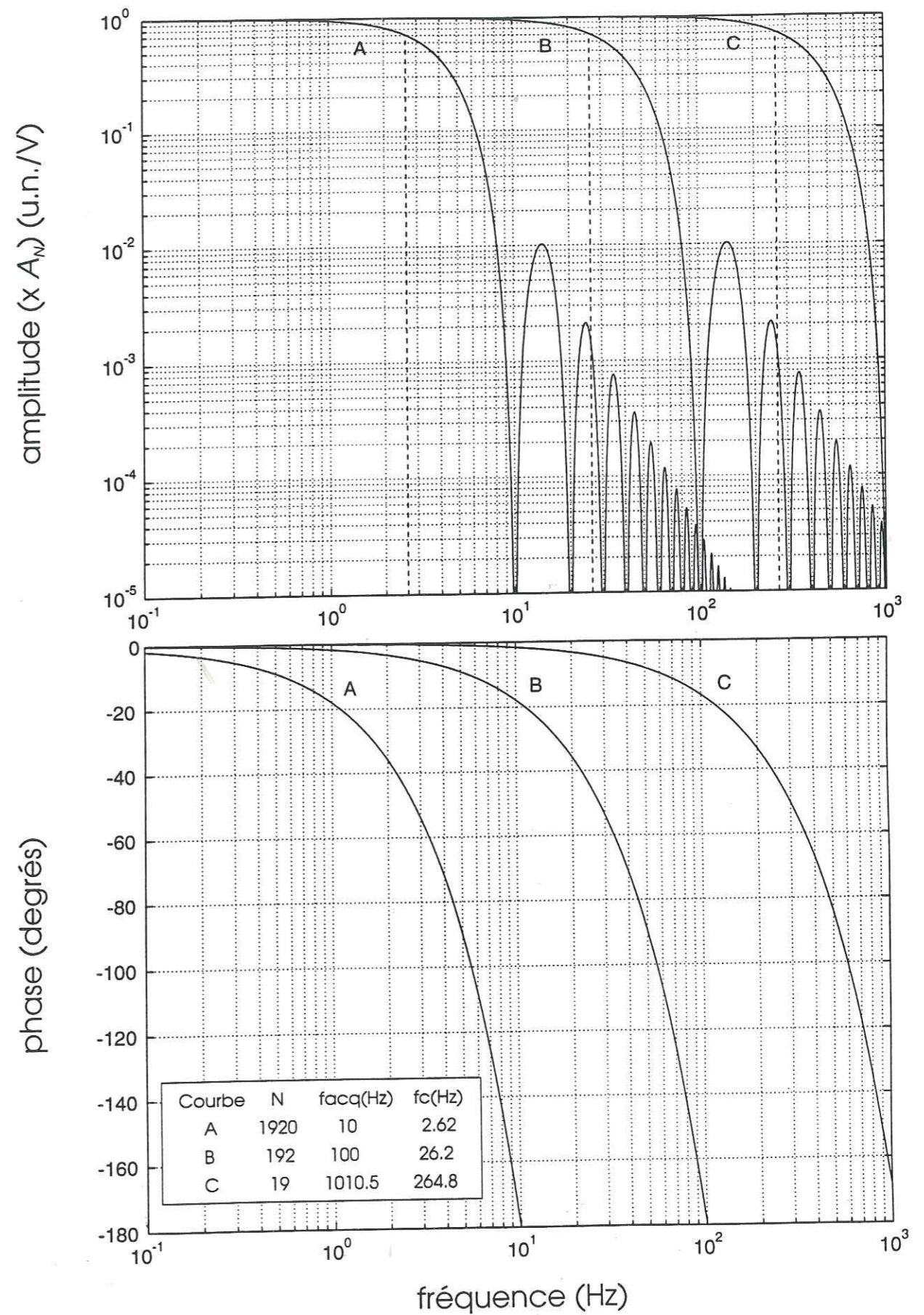


Figure 5.13 - Fonction de transfert analytique $H_3(w)$.
Filtre numérique du convertisseur sigma-delta AD7712.

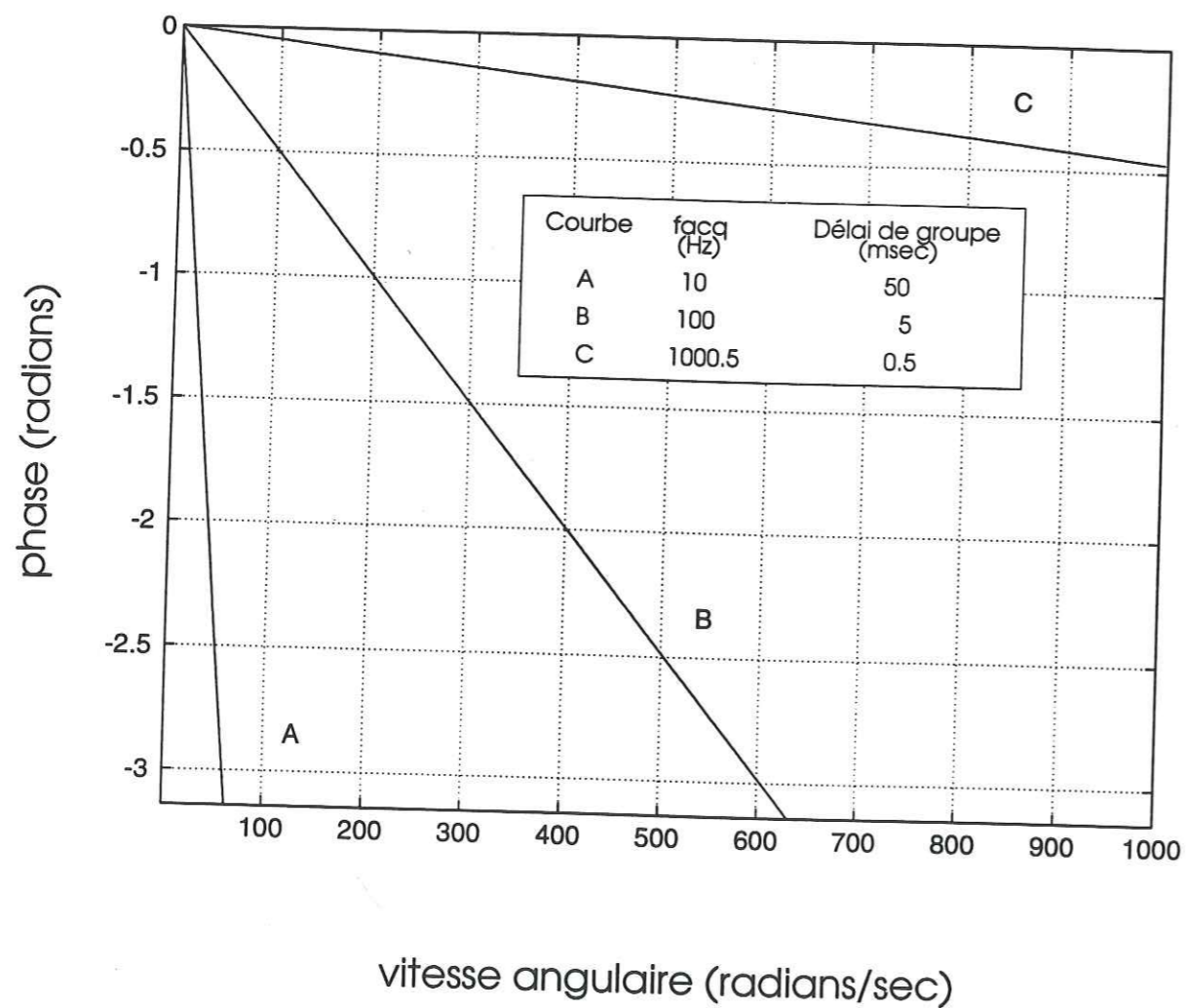


Figure 5.14 - Linéarité de la réponse en phase du filtre numérique du convertisseur sigma-delta AD7712.

où

$x(k)$ = séquence d'entrée

$y(k)$ = séquence de sortie

La première partie correspond au filtre MA ou filtre non récursif. La deuxième partie correspond au filtre AR ou filtre récursif.

b). Le facteur de conversion

Le signal à l'entrée du convertisseur est une tension, la sortie est un code numérique. On peut calculer facilement le facteur de conversion qui relie l'entrée en volts au code en unités de numérisation.

Un convertisseur a/n a une tension de saturation égale à $\pm V_{sat}$. Cette excursion doit être couverte par la dynamique du convertisseur 2^D (D est la dynamique du convertisseur en bits). On peut calculer la tension équivalente à une unité de numérisation.

$$1 \text{ u.n.} = \frac{2V_{sat}}{2^D} \text{ volts} \quad (5.55)$$

Ou, inversement, le nombre d'unités de numérisation associées à une tension égale à 1 volt.

$$1 \text{ volt} = \frac{2^D}{2V_{sat}} \text{ u.n.} \quad (5.56)$$

On définit ainsi, la constante A_N qui relie la tension d'entrée du convertisseur avec les codes de numérisation à la sortie.

$$A_N = \frac{2^D}{2V_{sat}} \frac{\text{u.n.}}{\text{volt}} \quad (5.57)$$

5.5.4 Fonction de transfert analytique de la station Sismalp 3

a). Réponse à la vitesse du mouvement du sol

On a dit que la station Sismalp 3 est constituée de trois blocs indépendants :

- le sismomètre amorti $H_1(\omega)$,
- l'électronique de conditionnement du signal $H_2(\omega)$,
- le convertisseur analogique numérique $H_3(\omega)$.

On a déduit des expressions analytiques pour les fonctions de transfert de ces blocs

$$H_1(\omega) = \frac{V_s}{\dot{U}} = -G \frac{R_a}{R_a + R_{bs}} \frac{(j\omega)^2}{(j\omega)^2 - 2\varepsilon(j\omega) + \omega_0^2} \frac{\text{volts}}{\text{m/sec}} \quad (5.58)$$

$$H_2(\omega) = K \frac{\frac{1}{RC}}{j\omega + \frac{1}{RC}} \quad (5.59)$$

$$H_3(\omega) = A_N \frac{1}{N} \frac{\sin^2\left(\frac{N\omega p}{2}\right) + j \sin\left(\frac{N\omega p}{2}\right) \cos\left(\frac{N\omega p}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\omega p}{2}\right) + j \sin\left(\frac{\omega p}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega p}{2}\right)} \frac{\text{u.n.}}{\text{volt}} \quad (5.60)$$

$$H(\omega) = H_1(\omega)H_2(\omega)H_3(\omega) \frac{\text{u.n.}}{\text{m/s}} \quad (5.61)$$

La figure 5.15 montre les trois blocs qui constituent la station Sismalp 3 et les courbes de leurs fonctions de transfert. L'entrée est la vitesse du mouvement du sol. Le sismomètre amorti agit comme un filtre passe-haut, avec une fréquence de coupure près de 1 Hz. L'électronique de conditionnement du signal est un filtre passe-bas, avec une fréquence de coupure égale à 2842 Hz et un gain égal à K/RC . Le convertisseur a/n est un filtre numérique Arma passe-bas, qui a une fréquence de coupure qui dépend de la fréquence d'acquisition. La sortie est une suite de codes en unités de numérisation.

La figure 5.16 montre la réponse de la station Sismalp 3 à la vitesse du mouvement du sol. La résistance d'amortissement du sismomètre est égale à 8904 ohms (facteur d'amortissement égal à 0.7). Le gain de l'amplificateur de l'électronique de conditionnement est égal à 1. La fréquence d'acquisition du convertisseur est égal à 100 Hz.

b). Réponse à la tension de calibration

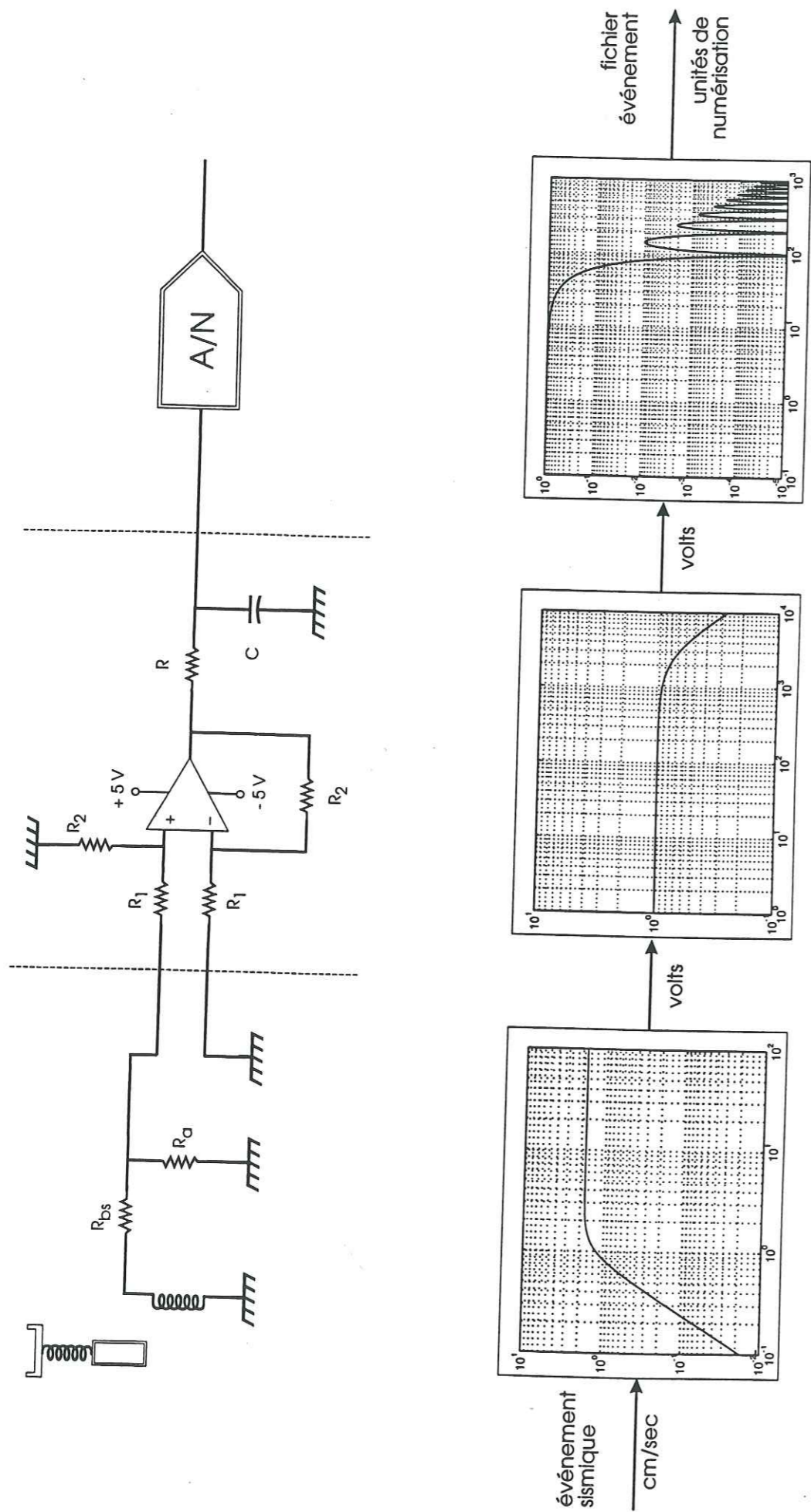
On a construit aussi la fonction de transfert de la bobine de calibration.

$$Q(\omega) = \frac{\dot{U}}{V_c} = \frac{C_c}{M(R_t + R_{bc})(-j\omega)} \frac{\text{m/sec}}{\text{volts}} \quad (5.62)$$

La fonction de transfert $Q(\omega)H(\omega)$ décrit la réponse de la station Sismalp 3 à la tension sur la bobine de calibration (voir figure 5.17).

$$Q(\omega)H(\omega) = \frac{V_n}{V_c} \frac{\text{u.n.}}{\text{volts}} \quad (5.63)$$

V_n est la courbe que l'on peut construire avec les données enregistrées par la balise.



Sismomètre amorti

Electronique de conditionnement du signal

Convertisseur analogique/numérique

Figure 5.15 - Les trois

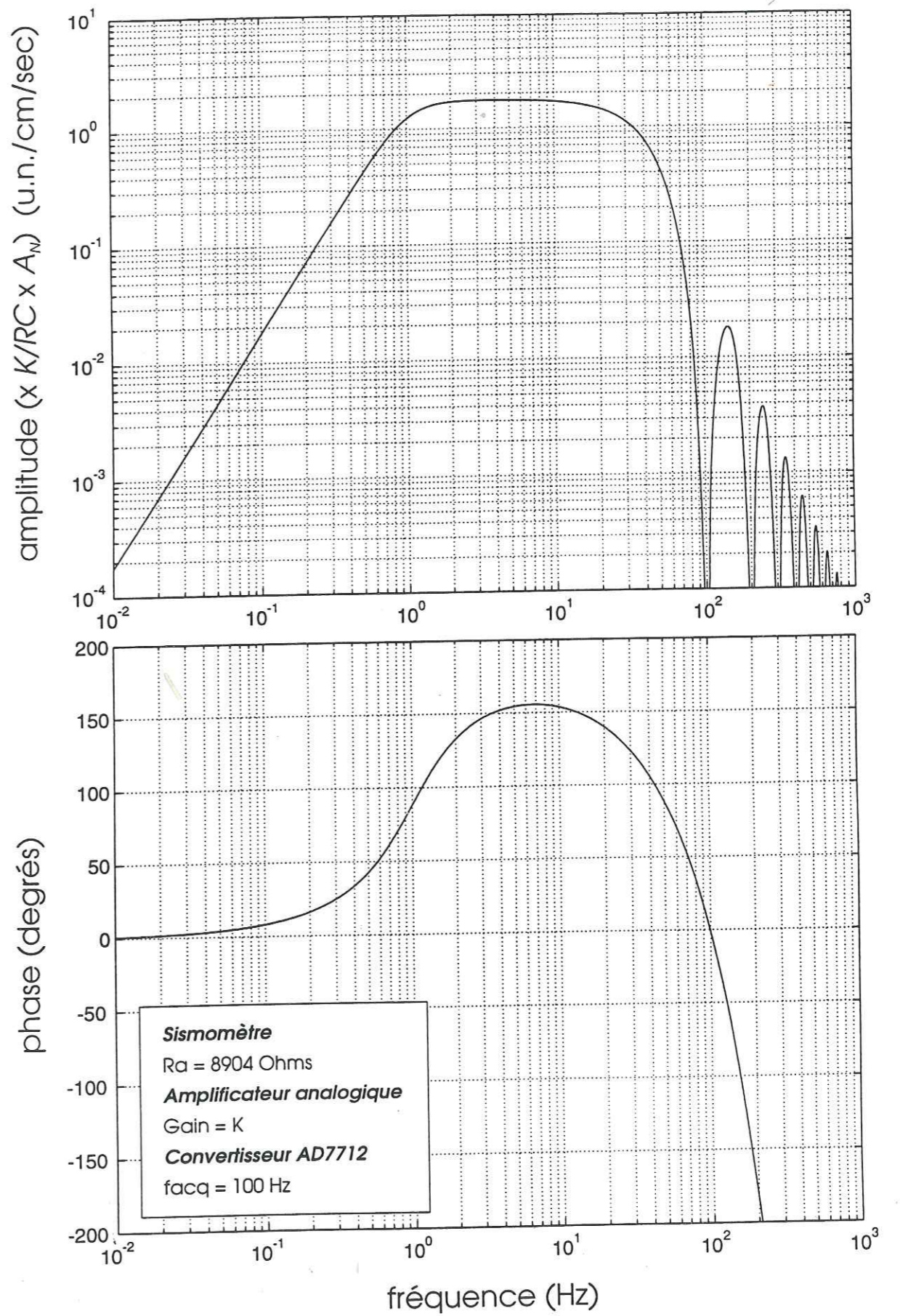


Figure 5.16 - Réponse à la vitesse du mouvement du sol.
 Fonction de transfert analytique $H(w)$.
 Station Sismalp 3. 189

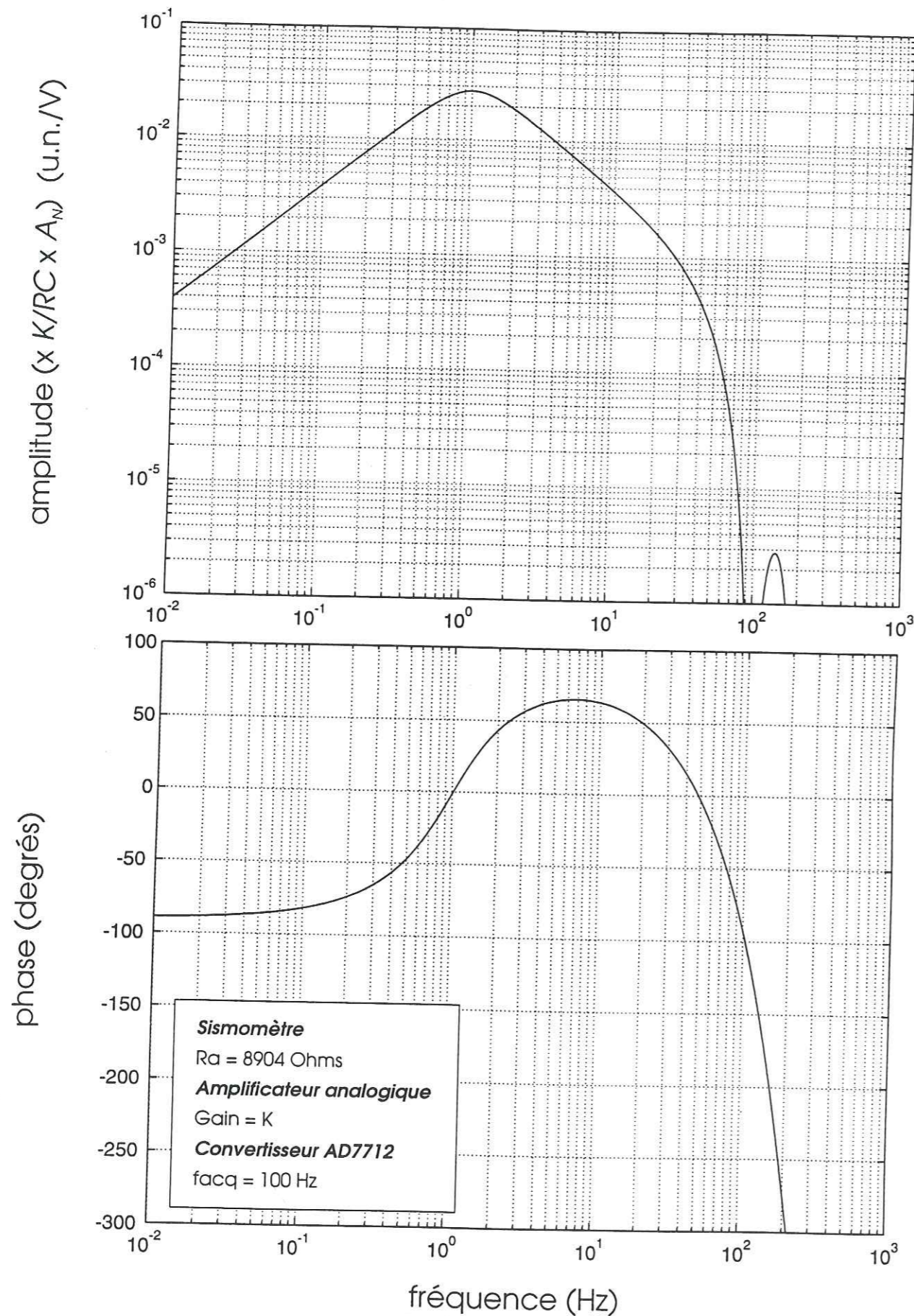


Figure 5.17 - Réponse à la tension de calibration.
 Fonction de transfert analytique $Q(\omega)H(\omega)$.
 Bobine de calibration et station Sismalp 3.

5.6 Opération de calibration et présentation des résultats

On présente maintenant l'implantation des méthodes qui ont été décrites et les résultats obtenus.

5.6.1 Génération du signal binaire pseudo-aléatoire

Le spectre du signal BPA est presque plat jusqu'à une fréquence de coupure qui est une fonction de la fréquence d'acquisition et de la valeur X (équation 5.2).

$$(5.2) \quad f_c = \frac{f_{acq}}{\pi X}$$

Notre méthode de calibration permet la détermination expérimentale des paramètres du sismomètre. On ne peut pas faire autant pour les autres blocs du système : le filtre passe-bas d'un pôle et le filtre numérique du convertisseur. Les arguments qui justifient ceci sont traités dans le paragraphe 5.6.4.

Nous avons choisi une fréquence d'acquisition égale à 100 Hz et une valeur de X égale à 3. Ceci détermine une fréquence de coupure égale à 10.6 Hz et un premier noeud (ou « trou ») à 33.33 Hz. Ces fréquences se trouvent bien au dessus des pôles que l'on veut étudier, ceux du sismomètre.

D'autre part, le temps enregistré doit être au moins égal à 40 fois la période la plus longue du capteur. On a fait des enregistrements d'une longueur de 40 secondes.

a). Algorithme de génération

Press *et al.* (1986) proposent plusieurs algorithmes pour générer un signal binaire pseudo-aléatoire. Nous avons modifié l'un de ces algorithmes pour notre opération de calibration.

- i). Le signal est représenté par une suite de valeurs binaires ($b = b_1, b_2, b_3 \dots$).
- ii). Les deux premiers éléments de la suite, b_1 et b_2 , sont toujours égaux à 0 et à 1. Les autres éléments sont générés par l'algorithme.
- iii). Le germe de génération est fourni par l'utilisateur. Il a une longueur de 16 bits.
- iv). On génère un élément b_i en faisant une opération « ou exclusif » (XOR) entre le bit le plus significatif (MSB) et le bit le moins significatif (LSB) du germe.
- v). On décale le germe vers la gauche. Son bit MSB est perdu et un espace est libéré du côté du bit LSB. On remplit cet espace avec l'élément b_i que l'on vient de créer. On appelle ce mot de 16 bits « le nouveau germe ».
- vi). On répète les pas iii et iv pour générer les autres éléments.

La séquence binaire est répétée toutes les $2^N - 1$ valeurs, où N est le nombre de bits du germe. Dans notre cas N est égal à 16, la période de répétition est donc égale à 65535. Le germe qui a été utilisé pour générer le signal est « 3441 ». Cette valeur a été prise au hasard. Un autre germe aurait été aussi valable.

b). Commandes de calibration

Trois commandes de dialogue sont disponibles pour contrôler le processus de calibration. Elles s'appellent CALI, CAOF et SKED.

c). Circuit de calibration

Le signal de calibration est fourni par une sortie logique de la station Sismalp 3. Une autre sortie logique indique le début et la fin de la procédure de calibration. Ces sorties utilisent des

tensions compatibles avec la technologie TTL¹. Ceci veut dire qu'un « 0 » logique est représenté par 0 volts et un « 1 » logique par 5 volts.

Pour que l'énergie du signal de calibration soit distribuée de façon uniforme, le signal de calibration doit être centré sur zéro. Un « 1 » doit être représenté par une tension positive et un « 0 » par une tension égale de signe opposé. D'autre part, le courant de calibration doit être limité aux valeurs spécifiés par le fabricant. Le circuit qui s'occupe de ces deux tâches est montré dans la figure 5.18. Les points B1 et B2 sont les sorties logiques de la station Sismalp 3. Les cercles noir et blanc représentent des portes trois-états. Ces composants sont des interrupteurs bidirectionnels qui peuvent être fermés avec un « 1 » logique sur la broche de contrôle (C1, C2) ou ouverts avec un « 0 » logique. La tension de référence de +2.5 volts est fournie par un composant très stable en température. L'amplificateur a un gain égal à l'unité. Le courant de calibration est contrôlé par la résistance R_I . Cette résistance doit être changée en fonction du sismomètre à calibrer.

L'amplitude du signal de calibration est déterminée par le gain du circuit de calibration. On a choisi un gain égal à 1. La tension de calibration qui sort de l'amplificateur est donc égale à +/- 2.5 volts.

Le courant de calibration doit rester autour des valeurs conseillées par le fabricant. Mark Products (Service Manual, Model L4, Low Frequency Geophone) propose un courant de calibration égal à 5 mA. Dans notre circuit le courant est contrôlé par la résistance R_I . Nous avons choisi une résistance égale à 260 ohms, ce qui limite le courant à une valeur de +/- 9.6 mA. On a dépassé le courant proposé pour améliorer le rapport signal sur bruit.

¹ La technologie TTL (Transistor Transistor Logic) utilise des transistors pour la construction de circuits intégrés logiques.

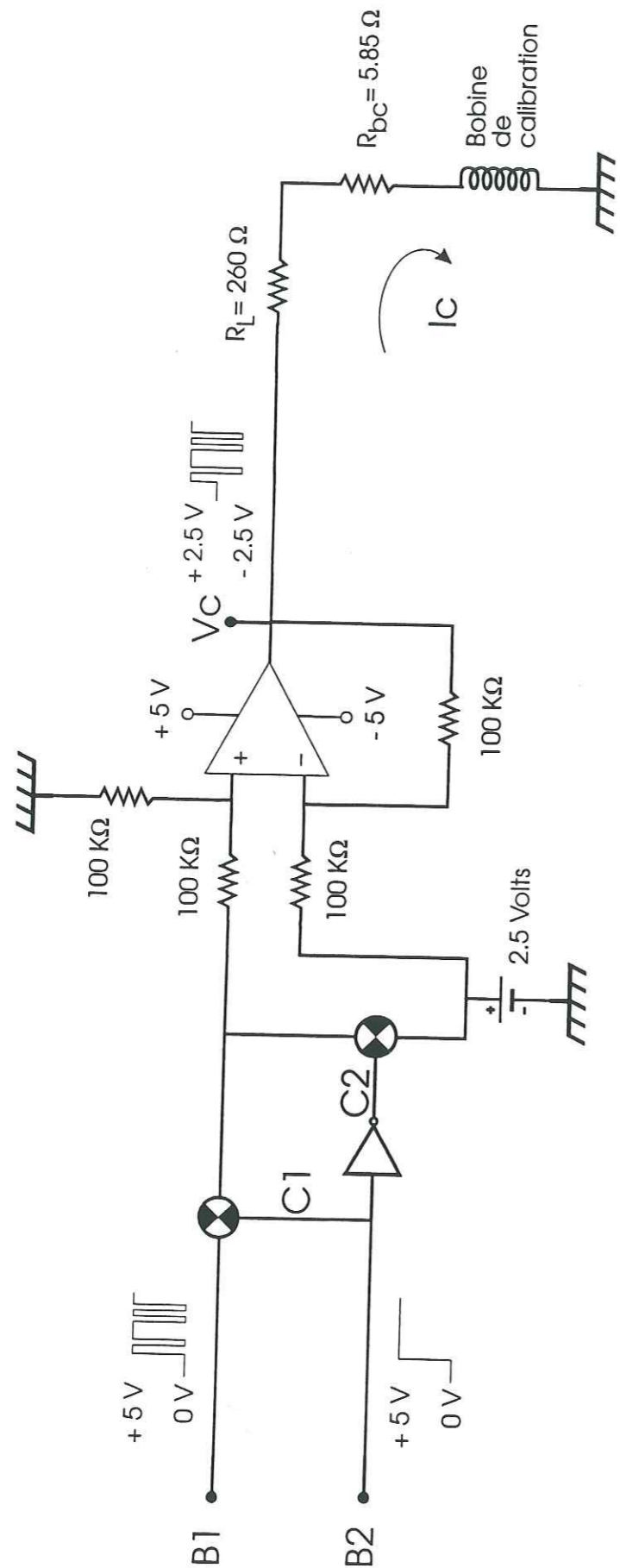


Figure 5.18 - Schéma fonctionnel du circuit de calibration.

5.6.2 Construction du spectre discret avec la méthode interspectrale

La méthode interspectrale nous permet de calculer le spectre discret du produit $H_r Q_r$. H_r est la fonction de transfert de la station Sismalp 3, Q_r est la fonction de transfert de la bobine de calibration.

$$(5.15) \quad H_r Q_r = R H_t Q_t$$

Le facteur de correction R est déterminé de façon numérique, à partir de l'interspectre de la sortie théorique S_t et la sortie expérimentale S_e .

$$(5.14) \quad R = \frac{\langle S_t^* S_e \rangle}{\langle S_t^* S_t \rangle} = \frac{\langle I_{te} \rangle}{\langle P_t \rangle}$$

La sortie expérimentale est enregistrée pendant l'opération de calibration. Pour calculer la sortie théorique on convolue un synthétique du signal de calibration V_c avec les fonctions de transfert analytiques H_t et Q_t , déterminées dans le paragraphe 5.5.

$$(5.7) \quad S_t = V_c Q_t H_t \frac{u.n.}{volts}$$

L'expression analytique de la bobine de calibration Q_t est égale à

$$(5.62) \quad Q_t(\omega) = \frac{U}{V_c} = \frac{C_c}{M(R_t + R_{bc})(-j\omega)} \frac{m/sec}{volts}$$

L'expression analytique de la fonction de transfert de la station H_t est égale à

$$(5.61) \quad H_t(\omega) = H_{t1}(\omega)H_{t2}(\omega)H_{t3}(\omega) \frac{u.n.}{m/sec}$$

H_{t1} est la fonction de transfert du sismomètre, H_{t2} est celle de l'électronique de conditionnement et H_{t3} celle du convertisseur analogique numérique.

$$(5.58) \quad H_{t1}(\omega) = \frac{V_s}{U} = -G \frac{R_a}{R_a + R_{bs}} \frac{(j\omega)^2}{(j\omega)^2 - 2\varepsilon(j\omega) + \omega_0^2} \frac{\text{volts}}{m/sec}$$

$$(5.59) \quad H_{t2}(\omega) = K \frac{1}{RC} \frac{1}{j\omega + \frac{1}{RC}}$$

$$(5.60) \quad H_{t3}(\omega) = A_N \left(\frac{1}{N} \frac{\sin^2\left(\frac{N\omega p}{2}\right) + j \sin\left(\frac{N\omega p}{2}\right) \cos\left(\frac{N\omega p}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\omega p}{2}\right) + j \sin\left(\frac{\omega p}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega p}{2}\right)} \right)^3 \frac{u.n.}{\text{volt}}$$

Le produit $Q_t H_t$ est donc égal à

$$(5.63) \quad Q_t(\omega)H_t(\omega) = \frac{V_n}{V_c} \frac{u.n.}{\text{volts}}$$

La figure 5.19 montre la tension de calibration v_c et les sorties expérimentale s_e et théorique s_t dans le domaine du temps. La figure 5.20 montre les transformées rapides de Fourier du signal d'entrée V_c , de la sortie théorique S_t et le produit des fonctions de transfert $Q_t H_t$. On peut apprécier le spectre du signal binaire pseudo-aléatoire qui est pratiquement plat jusqu'au noeud (ou « trou ») à 33.33 Hz. Pour permettre une meilleure présentation, les courbes ont été multipliées par des différents facteurs d'échelle.

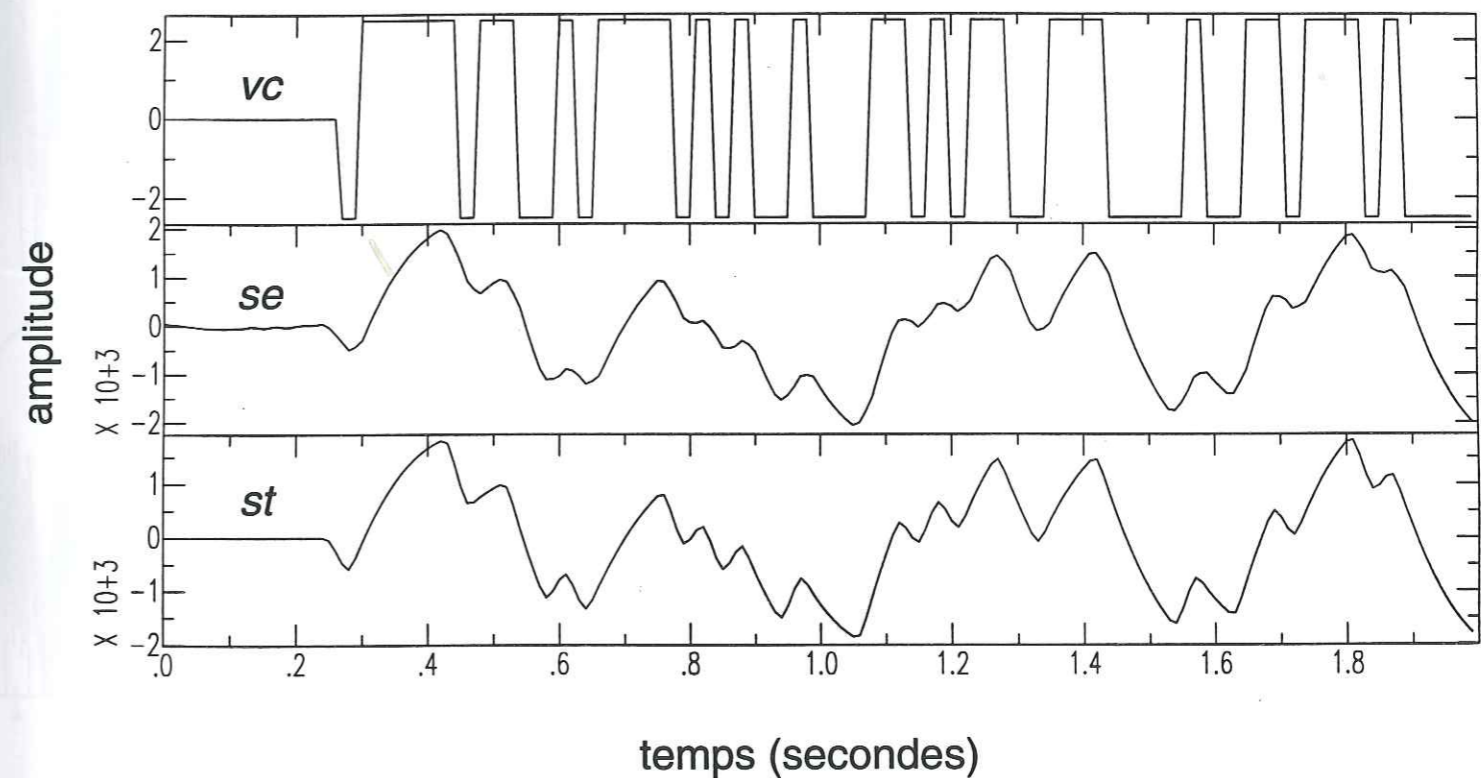


Figure 5.19 - Tension de calibration v_c , sortie expérimentale s_e et sortie théorique s_t .

Domaine du temps.

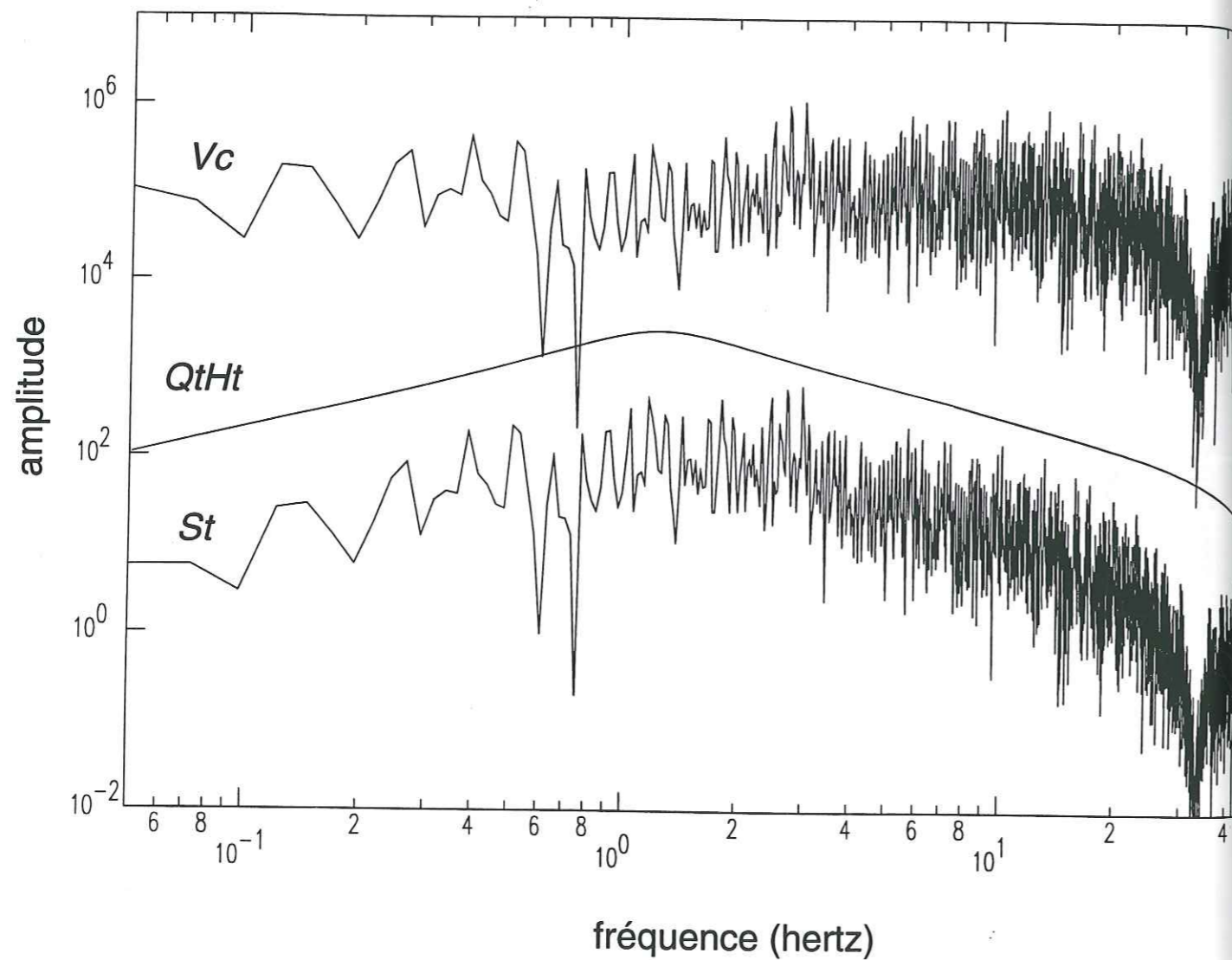


Figure 5.20 - Tension de calibration V_c , sortie théorique St et fonction de transfert $QtHt$.

Domaine de la fréquence.

5.6.3 Paramètres des expressions analytiques

Les paramètres des expressions analytiques sont fournis par le fabricant. On présente ici un extrait de la feuille d'inspection du sismomètre utilisé.

Feuille d'inspection Mark Products - N° de série 684

$C_c = 36.7 \text{ K dyne/ampère}$	(constante de calibration)
$\epsilon_0 = 0.264\epsilon_c = 0.264 \times 6.283 = 1.659$	(amortissement en circuit ouvert)
$G = 7.24 \text{ volts/pouce/sec} = 2.85 \text{ volts/centimètre/sec}$	(constante électrodynamique)
$M = 966.0 \text{ grammes}$	(masse du pendule)
$f_0 = 1.00 \text{ Hz}$	(fréquence naturelle du sismomètre)

Les valeurs des résistances ont été mesurées directement.

$R_l = 260 \Omega$	(Résistance limitante du circuit de calibration)
$R_{bc} = 5.85 \Omega$	(Résistance de la bobine de calibration)
$R_{bs} = 5370 \Omega$	(Résistance de la bobine de signal)
$R_a = 9110 \Omega$	(Résistance d'amortissement)

Le facteur d'amortissement du sismomètre est égal à

$$(5.21) \quad 2\epsilon = 2\epsilon_0 + \frac{G^2}{(R_{bs} + R_a)M} = 9.125$$

La vitesse angulaire naturelle est égale à

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 6.283$$

Les paramètres de l'électronique de conditionnement du signal sont

$$K = 1$$

$$R = 1000\Omega$$

$$C = 5.6nF$$

Les paramètre N du filtre numérique du convertisseur dépend de la fréquence d'acquisition (cf. paragraphe 5.5.3). Nous avons faits nos mesures à une f_{acq} égale à 100 Hz. La valeur de N est donc égale à

$$N = 192$$

p est le pas du sur échantillonnage. La fréquence de sur échantillonnage est une fonction du gain programmable du convertisseur (cf. paragraphe 5.5.3). Pour un gain égale à 1 on a

$$p = \frac{1}{19200\text{Hz}} = 5.208 \times 10^{-5} \text{ sec}$$

Le facteur de conversion A_N du convertisseur peut être calculée à partir de l'équation (5.57).

$$(5.57) \quad A_N = \frac{2^D}{2V_{sat}} \frac{u.n}{\text{volt}}$$

La tension de saturation du convertisseur est égale à 2.5 volts. La dynamique D du convertisseur est une fonction de la fréquence d'acquisition et du gain programmable (cf. paragraphe 2.1.2).

$$A_N = \frac{2^{18}}{2 \times 2.5} \frac{u.n}{\text{volt}} = 52428.8 \frac{u.n}{\text{volt}}$$

5.6.4 Minimisation avec la méthode du simplexe

a). Fonction de minimisation

La fonction de minimisation utilisée est

$$(5.16) \quad f(p_k) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} |\hat{Q}_i \hat{H}_i - QH(j\omega_i, p_k)|^2$$

- $\hat{Q}\hat{H}$ est le spectre discret expérimental trouvé avec la méthode interspectrale.
- QH est le modèle analytique de la fonction de transfert.
- p_k sont les paramètres modifiés à chaque itération k .
- k est l'itération en cours.
- n est le nombre de points du spectre discret.
- σ_i est le facteur de pondération que l'on utilise pour chaque fréquence $j\omega_i$.

Le facteur de pondération σ_i est égal à l'écart type calculé à partir des segments construits pour faire le lissage en fréquence. Ce facteur de pondération s'approche de l'unité de façon proportionnelle au nombre de segments considérés.

b). Paramètres qui interviennent dans la minimisation

Seulement les paramètres du sismomètre ont été modifiés à chaque itération dans le processus de minimisation. Les paramètres des autres blocs participent dans la construction de QH , mais ils ne changent pas de valeur.

i). Le sismomètre

Les paramètres calculés de façon expérimentale sont

- G , la constante électrodynamique,
- 2ε , le facteur d'amortissement,
- ω_0 , la vitesse angulaire naturelle.

Les résistances d'amortissement R_a et la résistance de la bobine de signal R_{bs} , de l'équation (5.58), ont été mesurées directement.

La réponse du sismomètre à la tension de calibration est affectée aussi par un facteur de gain introduit par la fonction de transfert de la bobine de calibration. Ce facteur est une fonction de quatre paramètres : R_l , R_{bc} , M et C_c . Pour déterminer expérimentalement la valeur de la constante électrodynamique il faut pouvoir déterminer les valeurs de ces paramètres avec précision.

Les résistances R_l et R_{bc} ont été mesurées directement. La masse du pendule M est un paramètre qui doit rester invariable, malgré des contraintes extérieures. On peut donc accepter la valeur fournie dans la feuille de calibration. Finalement, la constante de calibration C_c est associée au couplage magnétique entre la bobine de calibration et la masse du pendule. Ce couplage n'est pas une fonction ni de l'usure du capteur, ni de la température d'opération, car il n'y a pas des composants mécaniques en jeu. Le seul facteur qui peut le faire évoluer c'est une possible magnétisation de la masse du pendule. Mis à part cet effet, on peut supposer que la valeur fournie par le fabricant reste invariable en fonction du temps et des contraintes extérieures.

ii). L'électronique de conditionnement

L'électronique de conditionnement introduit un gain et un filtrage passe-bas anti-repliement. Le filtre passe-bas n'a pas une grande influence dans la période du spectre qui nous intéresse (0 à 50 Hz), car il a une fréquence de coupure égale à 2842 Hz. Inversement, on ne peut pas songer à étudier le pôle de ce filtre avec des enregistrements faits avec une fréquence d'acquisition égale à 100 Hz. Le gain introduit par le filtre ($1/RC$) peut être calculé à partir des mesures directes. Ce même argument est valable pour le gain de l'amplificateur opérationnel (cf. paragraphe 5.5.2).

iii). Le convertisseur analogique numérique

La technique utilisée pour la conversion (sigma delta) introduit un filtre numérique qui ne peut pas être déterminée avec précision par une méthode expérimentale. En effet, ce filtre a une fréquence de coupure qui est une fonction de la fréquence d'acquisition. Pour une fréquence d'acquisition égale à 100 Hz on a une fréquence de coupure de 26.2 Hz. Le théorème de Nyquist limite l'intervalle des fréquences utiles de 0 à 50 Hz. Dans la réalité, le signal commence à se détériorer à partir d'une fréquence de 10 Hz. Si l'on essaye d'augmenter la fréquence de acquisition à 1000 Hz, la fréquence de coupure du filtre dévient 262 Hz, ce qui le rend aussi inaccessible qu'auparavant.

Le filtrage est le résultat d'un calcul numérique fait par le convertisseur pendant le processus d'acquisition. Le fabricant fournit l'équation qui décrit cette opération (Analog Devices, communication personnelle). Les caractéristiques du filtre dépendent de la précision des variables utilisées pour ce calcul. On a considéré donc que la formule fournie est fiable et qu'il n'y a pas besoin d'une détermination expérimentale des paramètres.

iv). Conclusion

Seulement les paramètres du sismomètre G , 2ε , et ω_0 ont été calculés expérimentalement avec la méthode de minimisation. Les valeurs fournies par le fabricant sont considérées

fiables pour les autres paramètres. Toutes les résistances sont mesurées directement. Les paramètres qui ne sont pas calculés de façon expérimentale interviennent quand même dans la procédure de minimisation, car ils font partie des fonctions de transfert H et Q . Leurs valeurs restent immuables.

c). Critère de convergence

On utilise comme critère de convergence la différence relative entre deux valeurs successives de la fonction de minimisation.

$$(5.17) \quad r_{tol} = 2 \frac{|f_k - f_{k-1}|}{|f_k + f_{k-1}|}$$

Quand cette valeur descend au-dessous d'un seuil $ftol$ on dit que la convergence a été atteinte.

5.6.5 Résultats après la minimisation

On a utilisé une valeur de $ftol$ égale à 10^{-9} . Le calcul a convergé après 120 itérations. Les résultats ont été utilisés dans une nouvelle boucle comme des paramètres initiaux. Après 68 itérations on a obtenu les paramètres que l'on présente ci-dessous.

	<i>Paramètres initiaux,</i> par_i (volts/cm/sec)	<i>Paramètres finaux</i> (par'_i) (volts/cm/sec)	<i>Rapport</i> = $\frac{par'_i}{par_i}$
G	2.85	2.167	0.760
2ϵ	9.125	7.424	0.814
ω_0	6.283	7.774	1.237

Tableau 5.4 - Paramètres initiaux et paramètres finaux.

Les pôles associés peuvent être calculés à partir de l'équation

$$p_1, p_2 = \epsilon \pm \sqrt{\epsilon^2 - \omega_0^2}$$

	Pôles initiaux (p_i)	Pôles finaux (p'_i)	Rapport = $\frac{ p'_i }{ p_i }$
p_1	$4.563 + j 4.320$	$3.713 + j 6.831$	1.237
p_2	$4.563 - j 4.320$	$3.713 - j 6.831$	1.237

Tableau 5.5 - Pôles et zéros initiaux et finaux.

La figure 5.21 montre le facteur de correction de départ R et le facteur de correction calculés avec les nouveaux paramètres R' , pour l'amplitude. La figure 5.22 montre les mêmes facteurs, cette fois-ci pour la phase. Ce facteur est une mesure de l'erreur entre les fonctions de transfert théorique et réelle.

La figure 5.23 montre la fonction de transfert de départ $Q_i H_i$ et celle que l'on trouve après l'application de notre méthode $Q_i' H_i'$.

La figure 5.24 montre la réponse expérimentale du système au signal de calibration s_e et le synthétique construit avec les nouveaux paramètres s_i' .

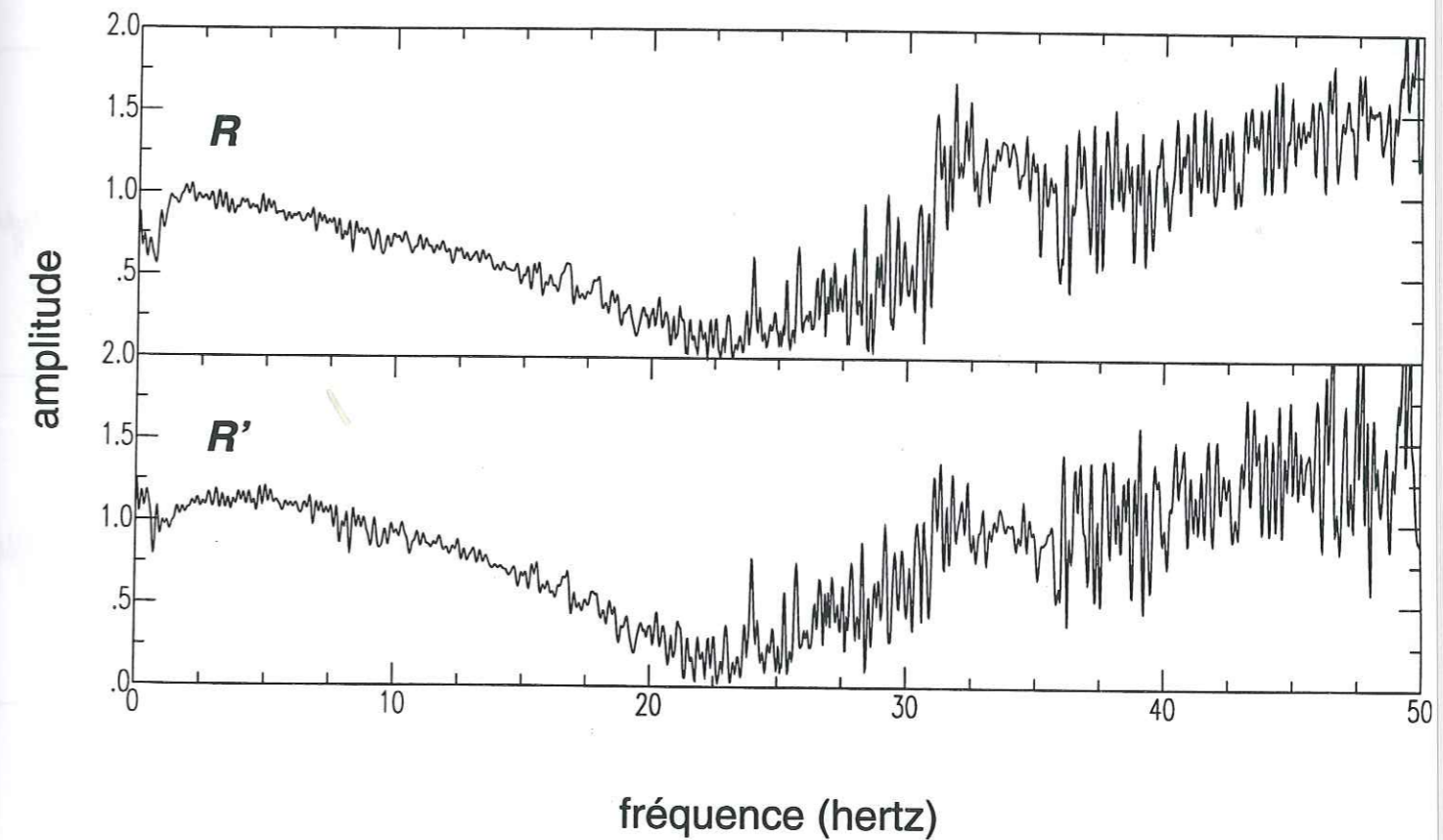


Figure 5.21 - Facteur de correction initial R et final R' (amplitude).

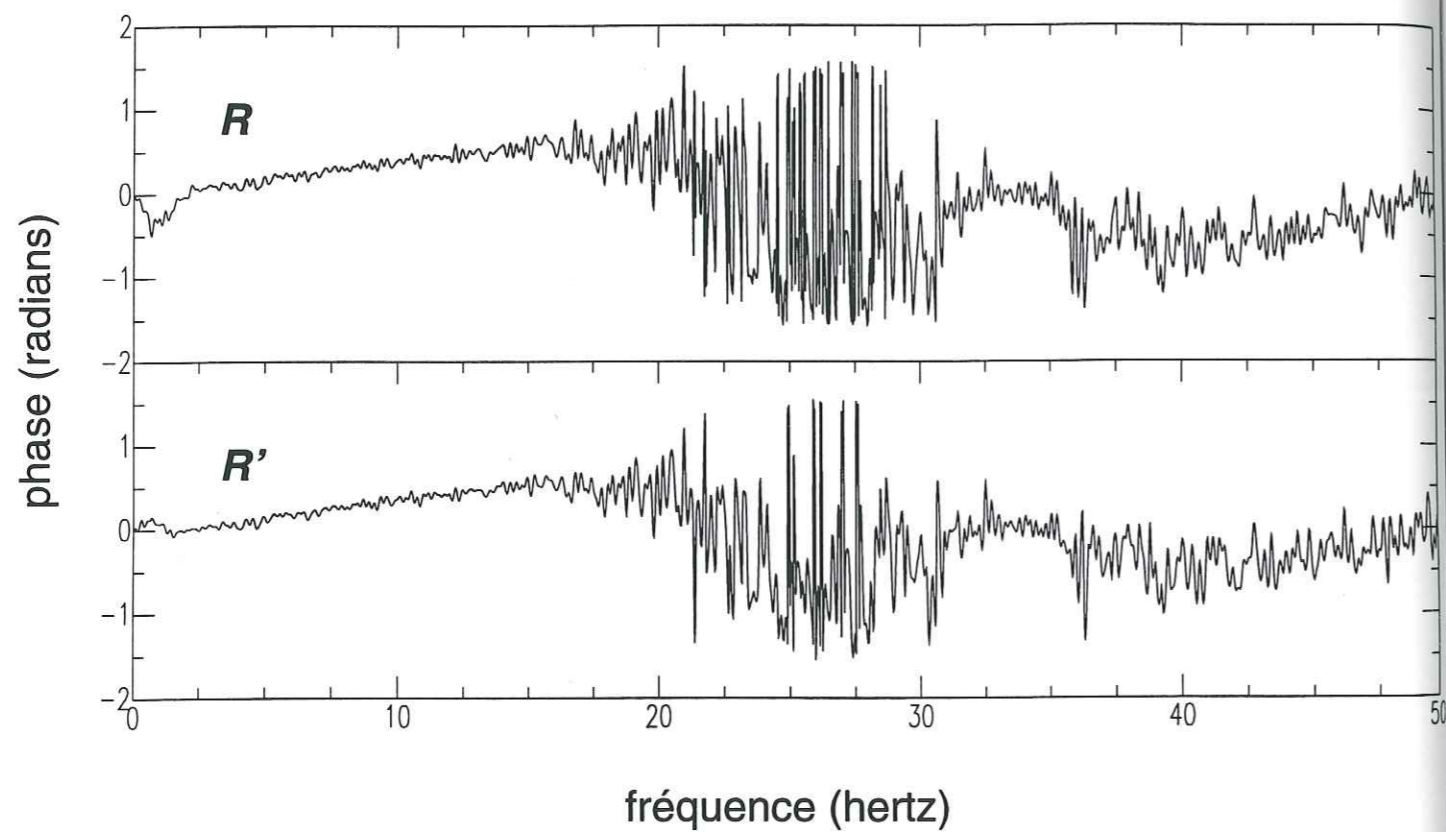


Figure 5.22 - Facteur de correction initial R et final R' (phase).

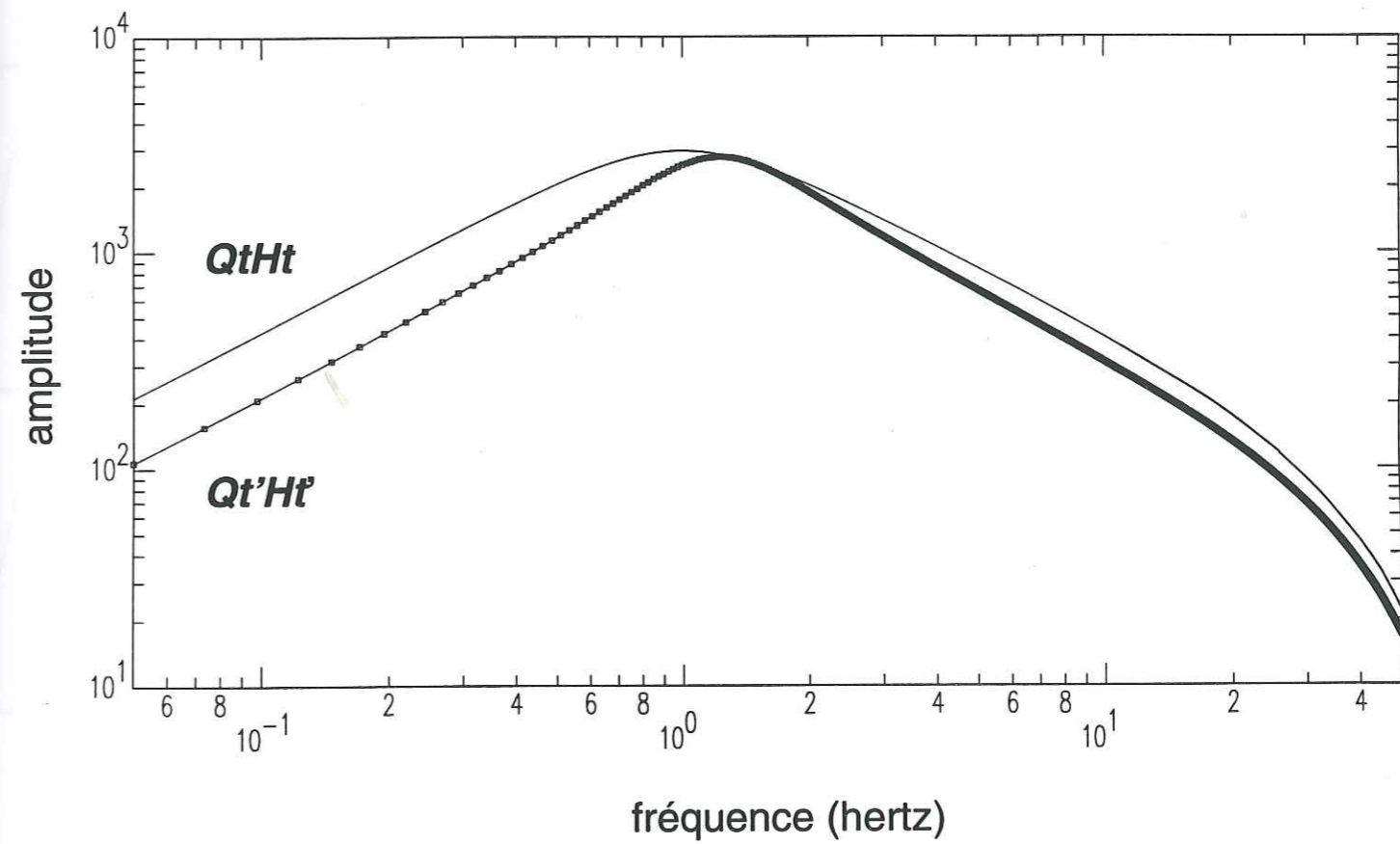


Figure 5.23 - Fonction de transfert initial $QtHt$ et final $Qt'Ht'$ (amplitude).

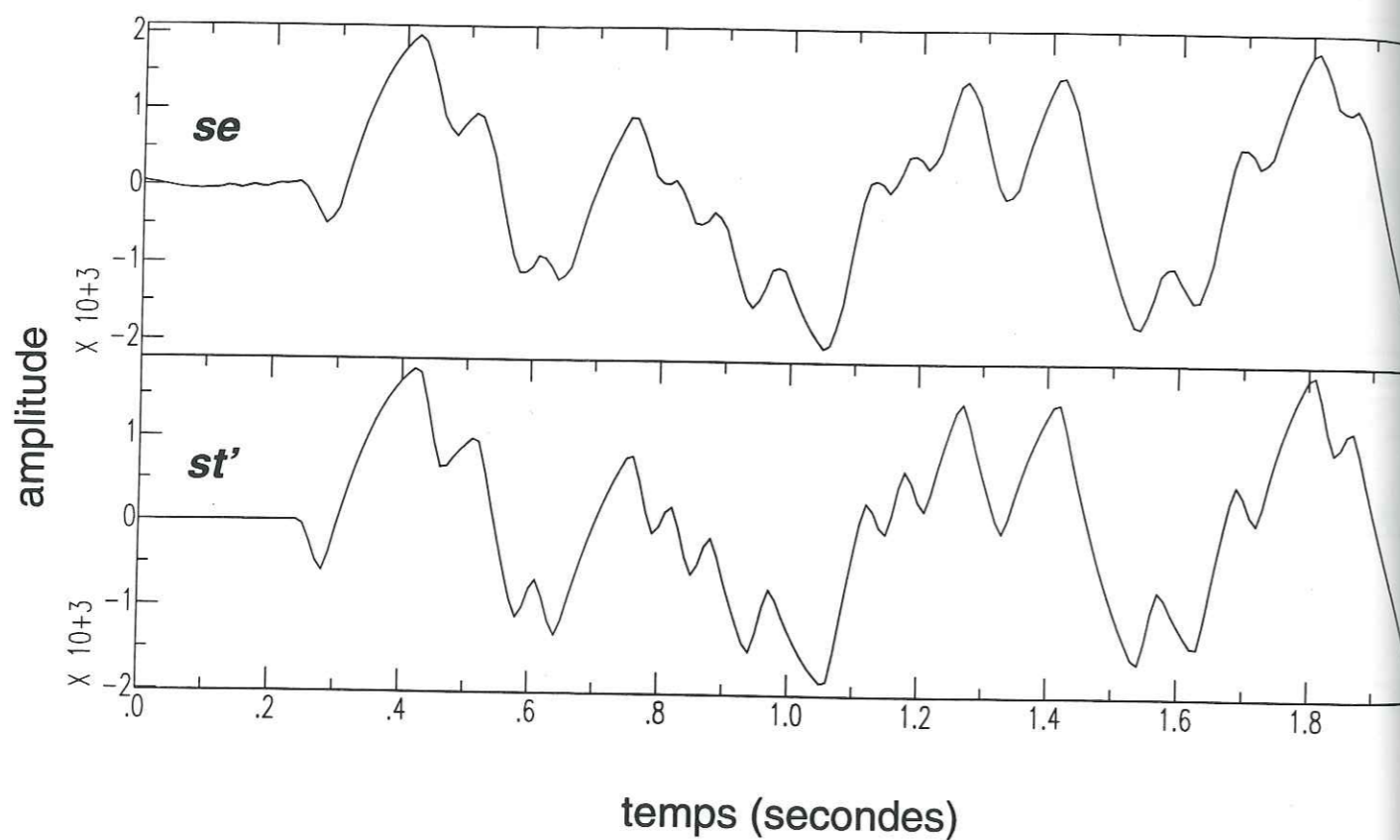


Figure 5.24 - Sortie expérimentale *se* et sortie théorique *st'* calculée avec les nouveaux paramètres

Domaine du temps.

5.7 Conclusions

- La station Sismalp 3 est constituée de trois blocs : un sismomètre amorti trois composantes, l'électronique de conditionnement du signal et le convertisseur analogique/numérique. On a déterminé une expression analytique pour chaque bloc. Les paramètres des expressions analytiques ont été calculés à partir des caractéristiques techniques fournis par le fabricant.
- La réponse du sismomètre à la vitesse du mouvement du sol est un système amorti de deuxième ordre, c'est à dire un rapport de polynômes en ω avec deux zéros à 0 Hz et deux pôles à 1 Hz. La fréquence naturelle de ce système est égale à 1 Hz. L'amortissement est déterminé par une résistance d'amortissement extérieure et par l'amortissement mécanique du système. Le facteur d'amplification est une fonction de la constante électrodynamique G , de la résistance d'amortissement R_a et de la résistance de la bobine de signal R_{bs} .
- L'électronique de conditionnement est constituée d'un amplificateur et un filtre passe-bas anti-repliement d'un pôle. Ce filtre a une fréquence de coupure à -3 dB égale à 2842 Hz. Ce filtre est suffisant pour éviter des phénomènes d'anti-repliement, car le convertisseur analogique/numérique fait un sur échantillonnage à une fréquence très élevée. Le facteur d'amplification introduit par cette étape est une fonction des résistances de polarisation de l'amplificateur opérationnel, et de la résistance et le condensateur du filtre.
- Le convertisseur analogique/numérique (Analog Devices AD7712) utilise une technique d'échantillonnage connue comme sigma delta. Cette technique consiste à faire un sur échantillonnage du signal, appliquer un filtre numérique ensuite et puis faire une décimation du signal pour le ramener à la fréquence d'acquisition désirée par l'utilisateur. La technique sigma delta permet des conversions de haute dynamique à un faible prix et avec une basse consommation.

La fréquence de sur échantillonnage de notre convertisseur est une fonction du gain programmable de la voie. Pour un gain égale à 1 cette fréquence est égale à 19200 Hz. La fréquence d'acquisition à la sortie peut être programmée entre 10 et 1010.5 Hz.

Le filtre numérique est un filtre passe-bas Arma de trois pôles, qui introduit une distorsion de phase linéaire. La fréquence de coupure de ce filtre est une fonction de la fréquence d'acquisition. Pour une fréquence d'acquisition de 100 Hz, on a une fréquence de coupure à -3 dB de 26.2 Hz. Une fréquence d'acquisition de 1010.5 Hz introduit une fréquence de coupure à -3 dB de 264.8 Hz.

- On a développé une méthode de calibration pour déterminer expérimentalement les paramètres du sismomètre : la constante électrodynamique G , le facteur d'amortissement 2ε et la vitesse angulaire naturelle ω_0 . Les résistances R_a et R_{bs} peuvent être mesurées directement.

- Le pôle introduit par le filtre anti-repliement ne peut pas être déterminé de façon expérimentale. Ceci n'a pas d'importance. En effet, le filtre introduit une fréquence de coupure qui se trouve bien au delà de la fréquence maximum d'acquisition. Le signal sismique n'est donc pas affectée par ce filtre.

- Les paramètres du filtre numérique ne peuvent pas être déterminés de façon expérimentale, non plus. La fréquence de coupure du filtre se trouve près de la fréquence d'acquisition et donc au delà de l'intervalle de fréquences que l'on peut explorer avec notre méthode. Si l'on augmente la fréquence d'acquisition, la fréquence de coupure se déplace aussi, restant toujours inaccessible. Ce filtrage est le résultat d'un calcul numérique fait par le convertisseur pendant le processus d'acquisition. Le fabricant fournit l'équation qui décrit cette opération. Les caractéristiques du filtre dépendent de la précision des variables utilisées pour ce calcul. En conséquence, on peut considérer que la formule fournie est fiable et qu'il n'y a pas besoin d'une détermination expérimentale des paramètres.

- La méthode de calibration consiste à introduire une tension binaire pseudo-aléatoire sur la bobine de calibration du sismomètre. On applique ensuite une méthode interspectrale qui nous fournit le spectre discret de la fonction de transfert. Finalement, on fait une minimisation avec la méthode du simplexe qui ajuste le modèle analytique de la station au spectre discret. Seulement les paramètres du sismomètre interviennent dans ce processus de minimisation.

- On a choisi comme tension de calibration un signal binaire pseudo-aléatoire. Ce signal est presque plat jusqu'à une fréquence de coupure qui est une fonction de la fréquence d'acquisition et de l'intervalle minimum de génération. Ce signal a des caractéristiques d'ergodicité et peut être reproduit à tout instant à partir d'un algorithme de génération.

- On a appliqué la méthode de calibration sur la voie verticale du sismomètre trois composantes. La méthode peut être appliquée séparément sur chaque voie.

- La bobine de calibration introduit une intégration et un facteur d'amplification. La réponse du sismomètre à la tension de calibration est un système amorti de deuxième ordre avec un pôle à 0 Hz et deux zéros à 1 Hz. Le facteur d'amplification introduit par cette étape est une fonction de la résistance qui limite le courant de calibration R_l , la résistance de la bobine de calibration R_{bc} , la masse du pendule M et la constante de calibration C_c . Les résistances sont mesurées directement. Les valeurs de M et de C sont fournies par le fabricant. Ces valeurs sont considérées fiables, car ils ne dépendent pas de composants mécaniques qui puissent être affectés par la température ou par l'usure du temps. Ce n'est pas le cas pour la constante électrodynamique G , le facteur d'amortissement 2ε et la vitesse angulaire naturelle ω_0 , qui eux, dépendent de composants mécaniques. Ces paramètres doivent être donc calibrés et leur évolution suivie.

- Une expérience de calibration a été menée à terme. On a fait des enregistrements de 40 secondes à une fréquence d'acquisition de 100 Hz. Cette expérience nous a donné des résultats valables dans un intervalle entre 1 et 10 Hz.

- Une deuxième expérience devrait avoir lieu. La fréquence d'acquisition pourrait être égale à 1010.5 Hz. La longueur des enregistrements pourrait être ramenée à 400 secondes. Ceci nous donnerait des résultats valables dans un intervalle entre 0.1 Hz et 100 Hz.

- Le lissage en fréquence est une méthode intéressante pour diminuer le bruit présent dans le signal. Deux méthodes sont disponibles pour faire ce genre de lissage.

La première consiste à découper le signal dans le temps en segments. On calcule après le spectre, ou l'interspectre, et on fait une moyenne sur tous les segments. Cette méthode est utile quand le signal que l'on veut lisser n'est pas reproductible. Si le signal est suffisamment long on peut déterminer beaucoup de segments.

La deuxième méthode consiste à faire plusieurs mesures du phénomène. On applique ensuite les opérations spectrales désirées et on calcule la moyenne sur l'ensemble des signaux. Cette méthode peut s'appliquer seulement quand le phénomène est reproductible.

- La pondération des différentes fréquences pendant la minimisation est faite pour tenir compte de l'incertitude introduite par le bruit. Le bruit est surtout présent dans la partie supérieure et inférieure du spectre. On utilise comme facteur de pondération l'inverse de l'écart type calculé à partir des segments déterminés. Jenkins et Watts (1968) démontrent que ce bruit suit une distribution $F_{2,v}$ et proposent une méthode pour le calculer.

- Notre méthode de calibration peut être utilisée de façon périodique pour suivre l'évolution des paramètres en fonction du temps et de la température. Le signal de calibration est généré par la balise. Trois commandes sont disponibles pour la programmation et l'automatisation de la méthode de calibration.

Chapitre 6 - Applications et conclusions

6.1 Applications

La station Sismalp 3 a été choisie par plusieurs institutions scientifiques en France et une au Pérou. La flexibilité de son architecture permet son utilisation dans des projets couvrant plusieurs aspects de la sismologie.

La configuration Sismalp 3 peut être utilisée dans des réseaux permanents et denses, où le coût et la consommation des stations sont les critères de choix. D'autre part, la configuration Sismalp 3 PC est plus adaptée à des applications temporaires où un grand flot de données est prévu. L'enregistrement continu est mis en valeur grâce au disque dur PCMCIA. La gestion de l'alimentation de la carte PC et du disque dur maintiennent la faible consommation de l'ensemble.

On présente ci-dessous la liste des institutions qui ont déjà acheté des stations Sismalp 3.

- Le réseau Sismalp, LGIT, Grenoble (11 Sismalp 3, 8 Sismalp 3 PC).
- Le réseau TOA, Orstom (8 Sismalp 3 PC).
- Le Centre d'Etudes de la Neige (1 Sismalp 3 PC).
- L'Observatoire Volcanologique de Clermont Ferrand (1 Sismalp 3 PC).
- Le Laboratoire de Géophysique de Corte, Corse (1 Sismalp 3).
- L'Institut Géophysique du Pérou (1 Sismalp 3).

Les trois premiers projets seront étudiés pour comprendre le spectre d'applications des configurations Sismalp 3 et Sismalp 3 PC.

6.1.1 Le réseau Sismalp

Le réseau Sismalp a comme objectif la surveillance de la sismicité alpine. Les données acquises sont utilisées pour faire des études d'évaluation de risque sismique, pour mieux comprendre la sismotectonique régionale et pour mieux connaître la structure profonde de la lithosphère alpine.

Le réseau Sismalp est constitué de stations permanentes basse consommation reliées au site central par ligne téléphonique. Sa base de données regroupe l'activité sismique des Alpes depuis le 13 septembre 1987¹. A la date de rédaction de ce document le réseau compte 40 stations mono composante qui couvrent la chaîne alpine depuis le lac Léman, en Suisse, jusqu'à la Corse. Une station trois composantes est installée au barrage de Roselend. Toutes les stations sont équipées avec des capteurs Mark Products L4C 1 Hz. La figure 6.1 présente une carte du réseau dans son état actuel.

L'un des objectifs actuels du réseau Sismalp est le passage à l'enregistrement trois composantes. Avant la fin de l'année 1996, 4 nouvelles stations trois composantes seront installées. Avant cette même date, 10 stations Sismalp 3 en configuration mono composante remplaceront également des stations Sismalp 1. Le passage du reste du réseau à l'enregistrement trois composantes sera fait en fonction des sources de financement disponibles.

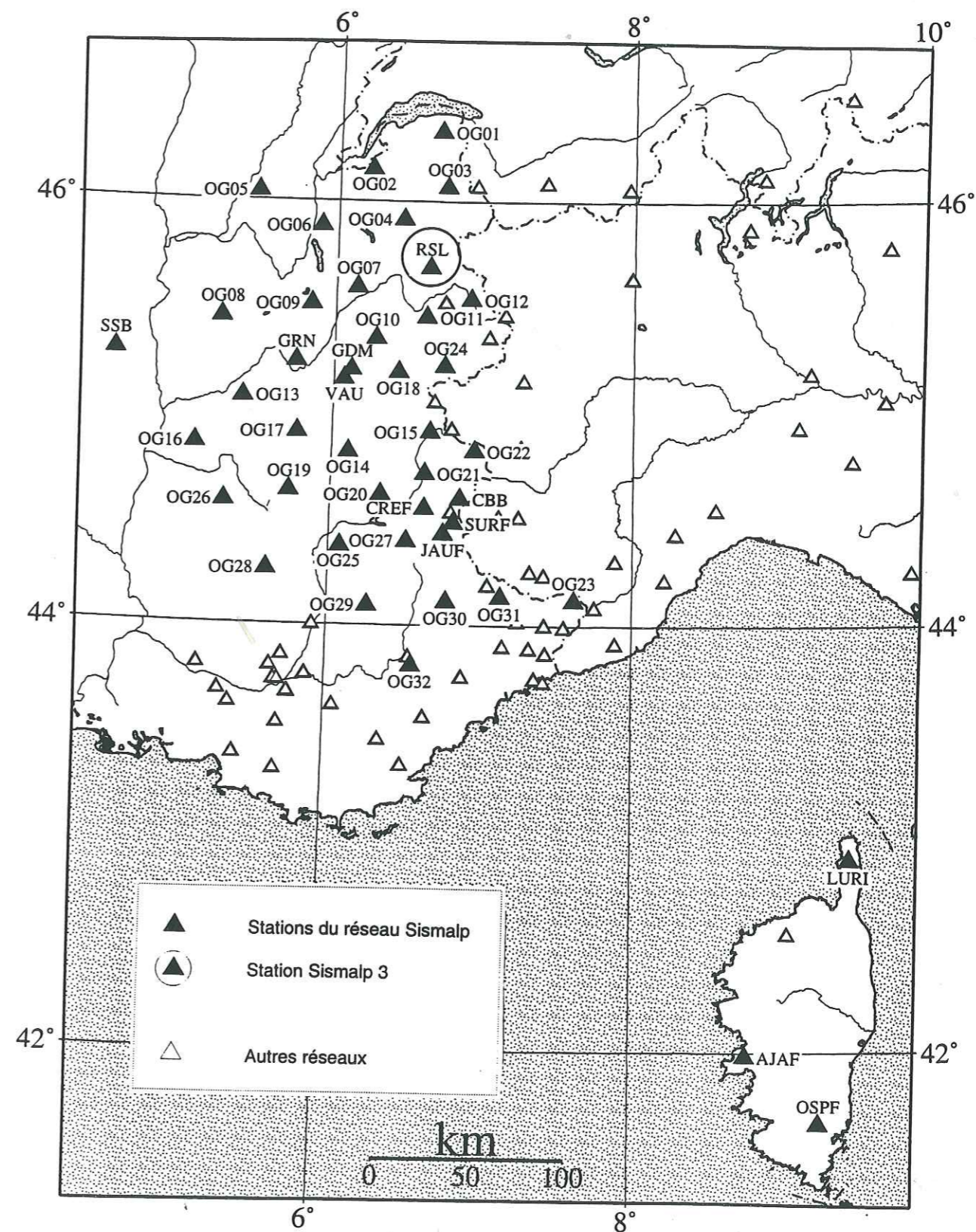


Figure 6.1 - Le réseau Sismalp.

¹ Il s'agit de la date du premier enregistrement numérique du réseau Sismalp (une station). Le premier séisme localisé (quatre stations) date plutôt du 3 avril 1988. Des enregistrements sur papier existent depuis la moitié de l'année 1984.

La balise Sismalp 3 s'adapte bien à l'architecture du réseau Sismalp. Son faible coût permet son insertion dans un réseau qui cherche une couverture assez dense de la chaîne alpine (30 km en moyenne entre les stations). Sa basse consommation restreint les interventions sur le terrain, réduisant ainsi le coût de maintenance du réseau. Enfin, la possibilité d'établir une communication par ligne téléphonique permet son intégration dans une région qui est bien couverte par le réseau téléphonique commuté.

La station Roselend (RSL) est opérationnelle depuis le premier août 1995. Les figures 6.2, 6.3 et 6.4 montrent un séisme régional qui a été enregistré le 18 avril 1996. La figure 6.2 reproduit le rapport émis par le réseau Sismalp. La figure 6.3 présente tous les enregistrements du réseau. On peut comparer l'enregistrement trois composantes RSL avec ceux des autres stations. Les stations SURF, GDM et GRN arrivent au laboratoire par ligne téléphonique et télémétrie. Elles sont traitées par le programme ACQ (J. Fréchet, J-P. Glot). La figure 6.4 montre seulement les enregistrements de la station RSL.

Les figures 6.5 et 6.6 montrent le télé-séisme du 28 mars 1996 (56.09° N, 170.50° W, en face de la côte de l'Alaska). Tous les enregistrements du réseau sont présentés dans la figure 6.5. La figure 6.6 reproduit seulement l'enregistrement trois composantes de la station RSL.

La figure 6.7 montre un séisme proche qui a saturé la station Sismalp 1 OG04 (10 bits). La station RSL n'a pas souffert de saturation, grâce à sa dynamique (18 bits à 100 Hz). L'hypocentre du séisme se trouve à 8 km de la station OG04 et à 37 km de la station RSL. Malheureusement, on n'avait pas de station Sismalp 1 au site de Roselend, à cette époque là. Cela nous aurait permis des comparaisons directes. Or, on a mesuré le rapport signal sur bruit au site RSL. On a obtenu une valeur égale à 275 (131072/22). Une station Sismalp 1 aurait saturé avec ce niveau de signal, car son rapport de saturation est égal à 85 (512/6).

RESEAU SISMALP

Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (CNRS/UJF) - Observatoire de Grenoble

Jeu 18 Avr 10:18:13

Cette feuille est destinée aux membres du laboratoire.
Veuillez ne pas diffuser ces informations sans notre accord. Merci.

Localisation préliminaire du séisme survenu le 18 avril 1996 à 05:31:40 UTC

Date	Heure	Lat. N	Lon. E	Prof.	Magn.	R.M.S.	ErH	ErZ
18.04.96	05:31:40.92	44°15.18'	06°53.91'	8.16	2,8	.37	.6	.9

21 km EST Allos (04)
22 km EST Colmars (04)
24 km SE Barcelonnette (04)

Code	Dist.	Azim.	Heure P	Res. P	Heure S	Res. S
OG30	18.6	211	05:31:44.62	-.01		
JAUF	22.9	329	05:31:45.49	.16	48.60	.19
OG31	23.2	126	05:31:45.38	.05		
SURF	26.2	345	05:31:46.20	.31		
OG27	34.8	297	05:31:47.14	-.12		
CBB	38.4	355	05:31:48.01	.10	52.99	.19
CREP	39.6	326	05:31:48.11	.03	53.52	.43
OG29	53.7	251	05:31:50.65	.30	58.14	1.19
OG21	56.0	337	05:31:50.91	.11	57.89	.18
OG32	56.2	209	05:31:50.64	-.17	57.75	.02
OG23	59.5	105	05:31:51.47	.12	58.47	-.18
OG20	60.4	312	05:31:51.42	-.13	58.62	-.37
OG22	63.4	3	05:31:52.12	.04	60.16	.27
OG25	67.1	281	05:31:52.72	.09	60.87	.03
OG15	75.8	345	05:31:54.04	-.14	63.76	.30
OC14	88.4	315	05:31:55.71	-.51	67.11	.17
OG19	102.4	294	05:31:58.54	-.04	71.08	.14
OG28	103.8	270	05:31:59.58	.75		
OG24	108.4	353	05:31:59.28	-.35	72.62	-.11
OG18	110.9	340	05:31:59.73	-.32	73.29	-.15
OG17	115.6	309	05:32:00.19	-.62		
VAU	120.4	327	05:32:01.04	-.61	15.60	-.57
GDM	122.5	330	05:32:02.02	.00	15.21	-1.58
OG10	131.7	338	05:32:03.45	-.08	19.27	-.08
OG26	132.2	286	05:32:04.23	.63		
OC11	135.3	350	05:32:03.65	-.48	20.87	.49
OG12	142.8	0	05:32:04.70	-.74	22.46	-.14
GRN	143.0	320	05:32:05.35	-.09	21.59	-1.01
OC13	149.8	307	05:32:06.51	-.02		
OG16	157.6	295	05:32:07.32	-.57	26.54	-.22
OG07	160.5	338	05:32:07.84	.07		
OG07	160.5	338	05:32:08.26	-.11	28.06	.48
RSL	161.0	352	05:32:07.91	-.60		
RSL	161.0	352	05:32:00.00		28.41	.59
OG09	163.2	329	05:32:08.77	-.03	28.69	.37
OG08	186.6	315	05:32:11.18	.19		
OG04	188.1	349	05:32:12.50	1.22	35.22	2.68
OG06	197.6	336	05:32:12.86	.49	35.14	.75
OG03	202.0	356	05:32:13.42	.45		
OG03	202.0	356	05:32:14.64	-.75		
SSB	218.6	301	05:32:14.30	-.71	38.47	-.40
SSB	218.6	301	05:32:18.25	.08		
OG05	228.7	330	05:32:16.40	.17		
OG05	228.7	330	05:32:00.00		47.92	.81
OG01	231.4	356	05:32:18.11	1.45		
OG01	231.4	356	05:32:00.00		49.35	1.37
LURI	251.6	127	05:32:17.29	-1.77	43.45	-2.30
COLF	288.5	299	05:32:22.78	-.97		
ACAF	292.9	149	05:32:00.00		54.00	-.54

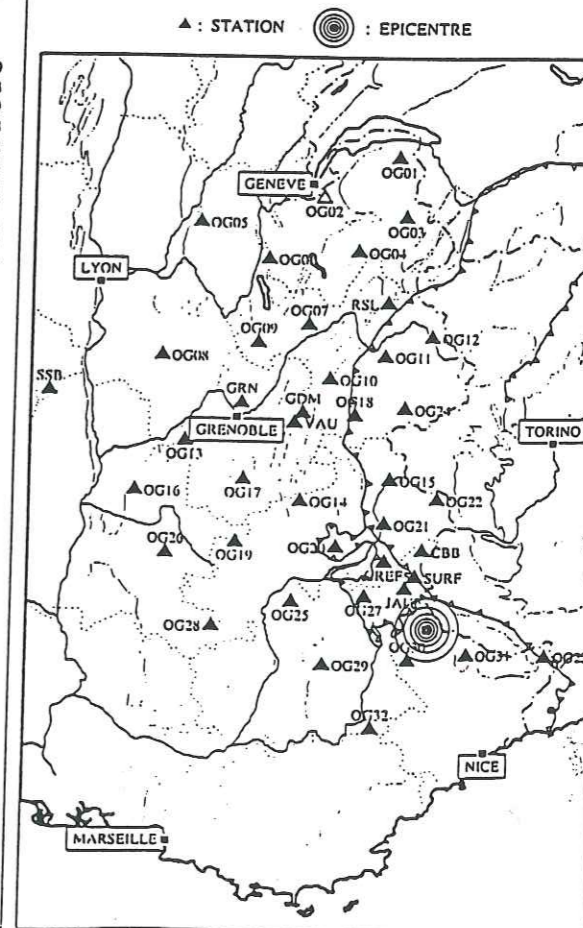


Figure 6.2 - Séisme régional du 18 avril 1996. Rapport émis par le réseau Sismalp.

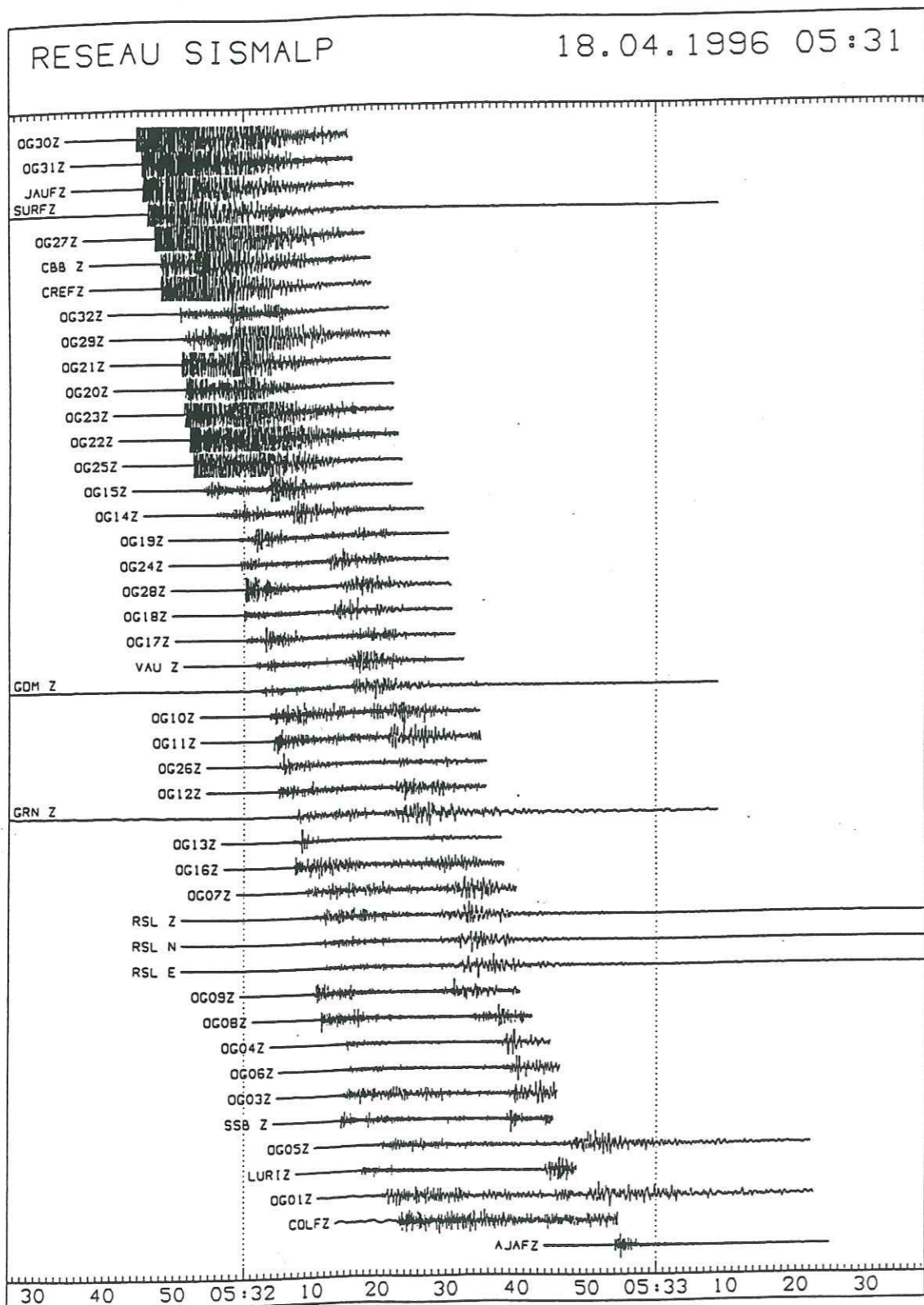


Figure 6.3 - Séisme régional du 18 avril 1996. Enregistrements de tout le réseau.

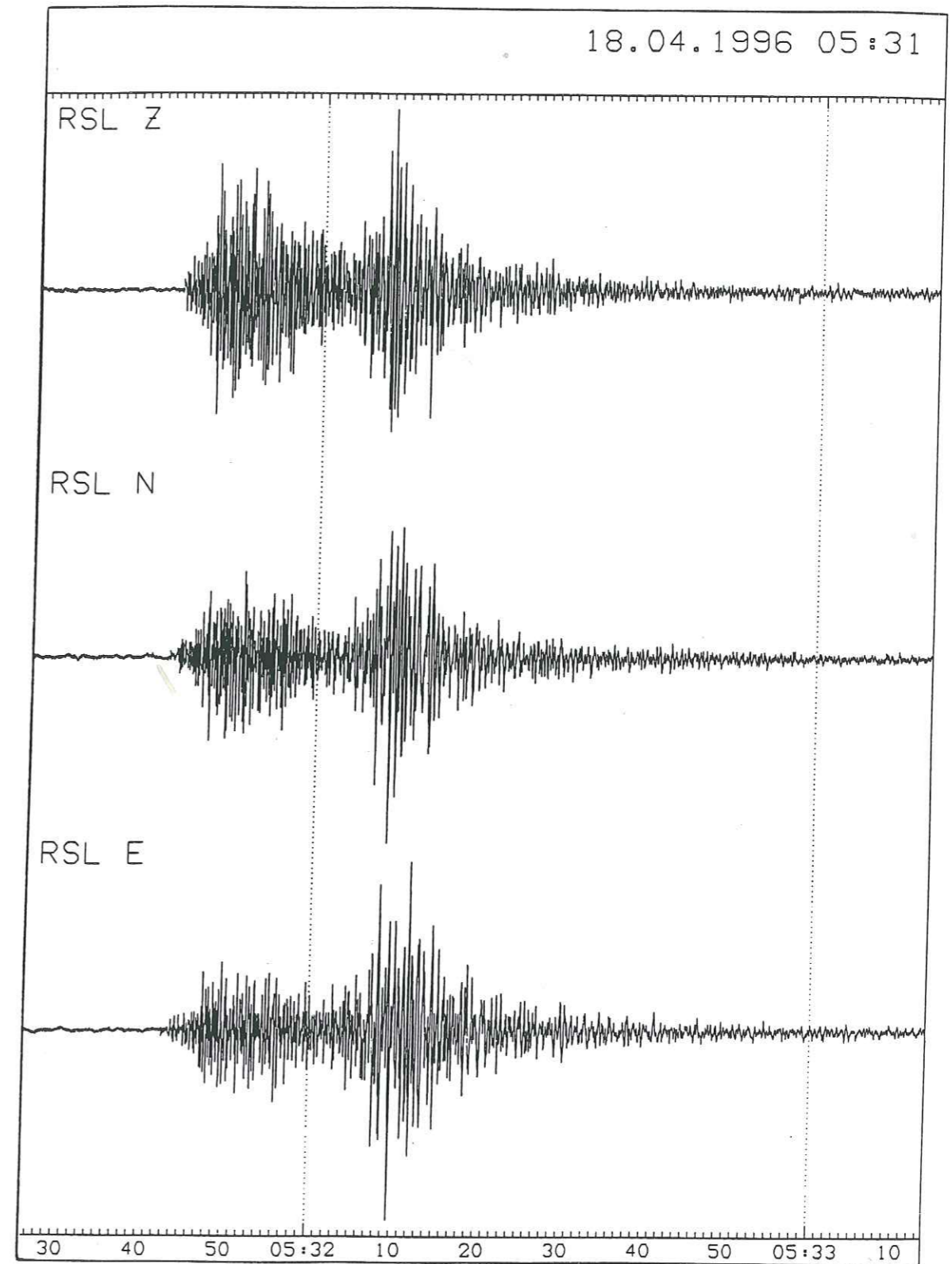


Figure 6.4 - Séisme régional du 18 avril 1996. Enregistrements de la station RSL.

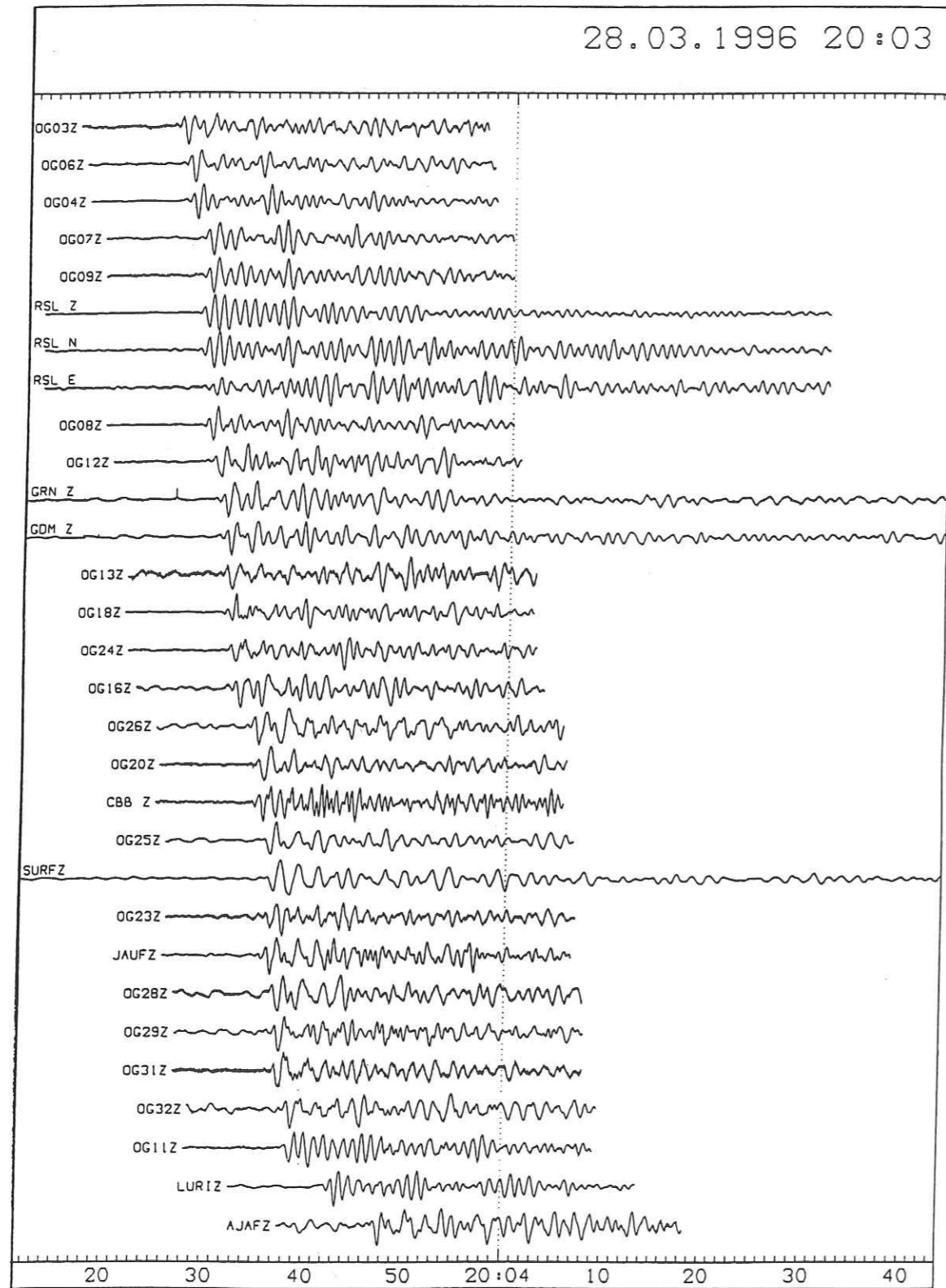


Figure 6.5 - Téléseisme du 28 mars 1996. Enregistrements de tout le réseau.

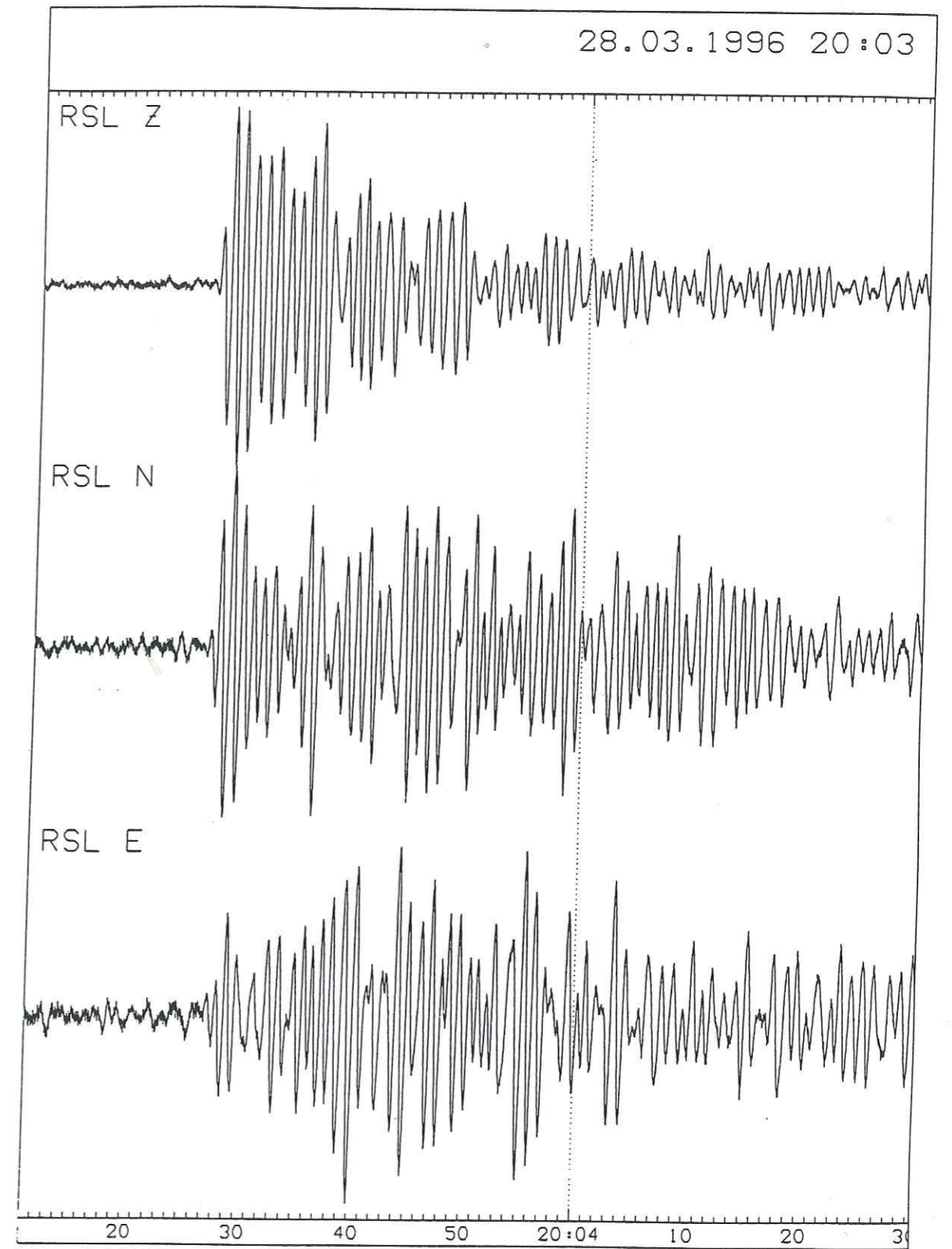


Figure 6.6 - Téléseisme du 28 mars 1996. Enregistrements de la station RSL.

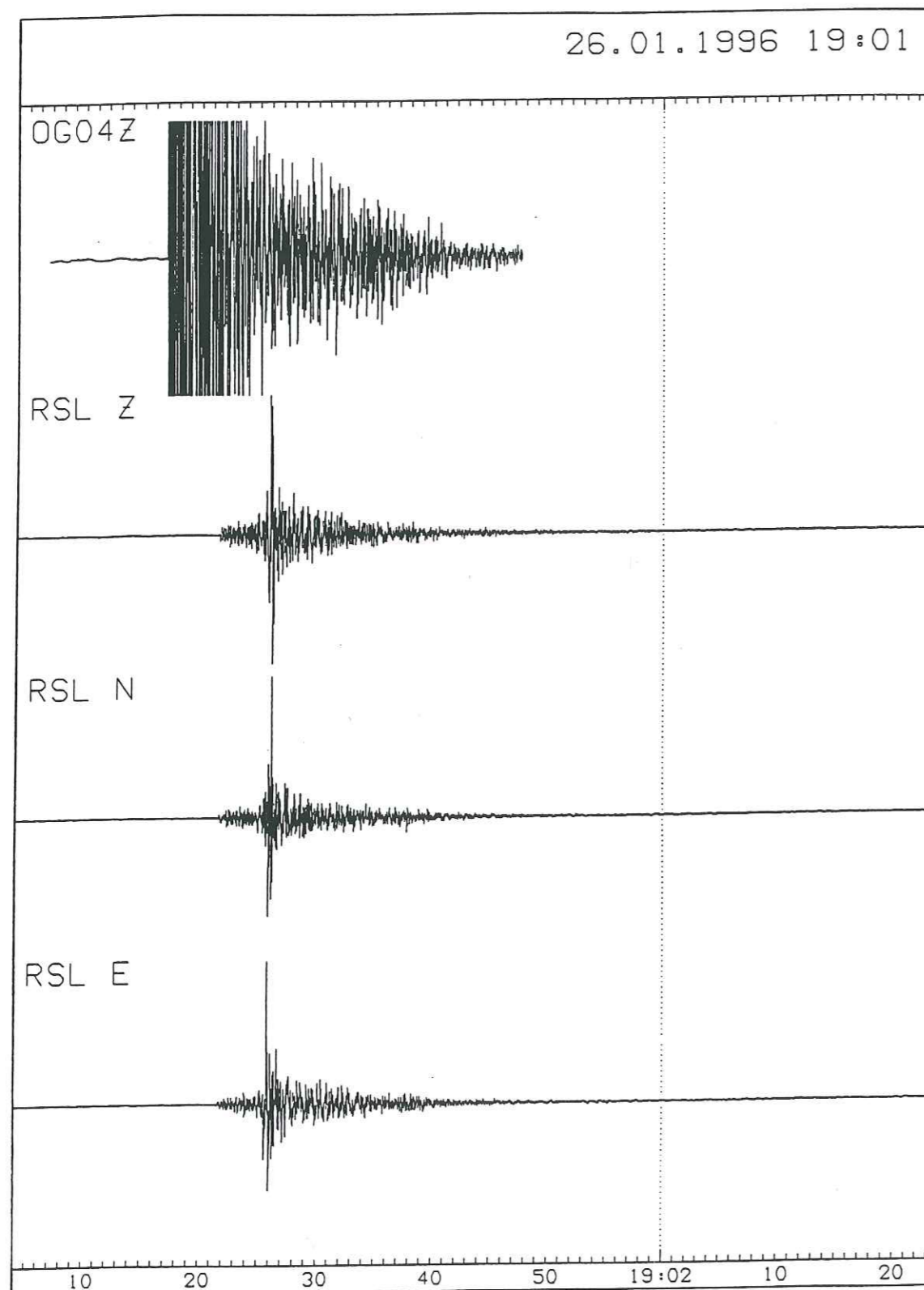


Figure 6.7 - Saturation des enregistrements.

Le passage aux trois composantes du réseau Sismalp a plusieurs avantages. Les composantes horizontales sont indispensables pour la localisation précise des séismes proches, au-dessous de la station. Dans ce cas particulier, toute l'énergie de l'onde S se trouve dans un plan perpendiculaire à l'axe vertical. Les ondes S ne seront pas enregistrées par une station avec une seule composante verticale. Une autre application consiste à calculer l'azimut de l'arrivée de l'onde P en faisant une rotation de composantes. Cette rotation permettra de trouver l'orientation où toute l'énergie de l'onde P sera concentrée sur un seul axe. Enfin, l'enregistrement des trois composantes permet la connaissance du champ complet de l'onde sismique. Cette information est indispensable pour étudier la source sismique, le milieu de propagation et les effets d'amplification du site. Une étude d'anisotropie de la région alpine sera effectuée par le réseau Sismalp quand des données seront disponibles.

La station Sismalp 3 représente une évolution considérable vis-à-vis de la station Sismalp 1. Le tableau 6.1 compare les caractéristiques techniques des deux stations.

	<i>Sismalp 1</i>	<i>Sismalp 3</i>
Microprocesseur	MC6805 (8 bits)	MC68HC11 (16 bits)
Convertisseur analogique/numérique	ADC804	AD7712 (sigma delta)
Nombre de voies	1	3
Dynamique	10 bits	Fonction de f_{acq} et G. Ex : 18 bits ($f_{acq} = 100$ Hz, $G = 1$).
Fréquence d'acquisition (f_{acq})	4 à 250 Hz	10 à 1010.5 Hz
Gain programmable (G)	non	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 (Programmable de façon indépendante sur chaque voie)
Modes d'enregistrement	- Par déclenchement (STA/LTA et seuil fixe).	- Par déclenchement (STA/LTA et seuil fixe). - Enregistrement continu.
Rapport STA/LTA	2 à 10	1.1 à 25.5
Détection de fin d'événement	non	oui (STA/LTA)

Tableau 6.1 - Caractéristiques techniques des balises *Sismalp 1* et *Sismalp 3*.

	<i>Sismalp 1</i>	<i>Sismalp 3</i>
Capacité de stockage	64 Koctets	2 Moctets ou 340 Moctets (<i>Sismalp 3</i> PC)
Compression en ligne	non	oui (sigma delta)
Gestion de la mémoire pleine.	Effacement de l'événement de plus faible amplitude moyenne.	- Effacement de l'événement de plus faible amplitude moyenne. - Tampon tournant (enregistrement continu). - Vidage sur disque dur (<i>Sismalp 3</i> PC).
Carte PC et disque dur	non	N'importe quel carte PC et disque dur. Ex : 386SX PC-104, PCMCIA 340 Mo.
Consommation	12 V, 6 mA (72 mW)	<i>Sismalp 3</i> : 12 V, 60 mA (720 mW). <i>Sismalp 3</i> PC : 12V, 85 mA (1.02 W). (enregistrement continu, $f_{acq} = 100$ Hz, voir chapitre 4, paragraphe 4.6).
Communication téléphonique	1200 bps	N'importe quel modem Hayes (jusqu'à 28800 bps). Ex : US Robotics, World Port Lite. * ITU-T V32 bis (14400 bps). * ITU-T V42, MNP 2-4 (correction d'erreurs). * ITU-T V42 bis, MNP5 (compression de données).

Tableau 6.1 (suite) - Caractéristiques techniques des balises *Sismalp 1* et *Sismalp 3*.

Le réseau Sismalp dispose aussi d'un parc de huit stations Sismalp 3 PC. Ces stations constituent un réseau mobile qui sera utilisé pour l'étude rapide des répliques des séismes alpins. L'étude des répliques des séismes faibles sera possible grâce au mode d'enregistrement continu.

Le réseau mobile Sismalp sera mis à l'épreuve dans la campagne de sismicité Géo France 3D. Il s'agit d'une étude de sismotectonique et tomographie dans les Alpes occidentales. Les huit stations Sismalp 3 PC seront installées dans le Briançonnais, entre les massifs du Pelvoux et de l'Argentera. Cette expérience est d'une grande importance du point de vue de l'instrumentation, car il s'agit du premier essai, en grandeur réelle, de plusieurs types de stations trois composantes, dans les Alpes. Toutes les caractéristiques qui définissent la qualité d'une station pourront être étudiées de façon comparative : la dynamique du convertisseur, la consommation des stations, l'efficacité dans la détection, la construction de fichiers, les processus d'installation et maintenance, etc. Le tableau 6.2 présente une liste préliminaire des stations qui participeront dans l'expérience Géo France 3D.

<i>Nom</i>	<i>Une composante</i>	<i>Trois composantes</i>
Sismalp 3 PC		8
Sismalp 1	14	
Lithoscope	5	
Lithoscope		5

Tableau 6.2 - Liste préliminaire des stations qui participeront dans Géo France 3D.

<i>Nom</i>	<i>Une composante</i>	<i>Trois composantes</i>
Mars 88		20
Mars Light (3C)		4
TAD	25	
Titan DAT		6

Tableau 6.2 (suite) - Liste préliminaire des stations qui participeront dans Géo France 3D.

6.1.2 Le réseau sismologique TOA

Le département TOA de l'Orstom a acquis en 1995 un réseau sismologique destiné à des applications en sismotectonique et volcanologie. Ce réseau est composé de 20 stations, dont 12 stations autonomes et 8 stations télémetrées. Les stations sont équipées de sismomètres trois composantes et 1 composante, Mark Products 1 Hz et 2 Hz.

Le parc de stations autonomes est constitué de 8 stations Sismalp 3 PC et de 4 stations Reftek 72A-07.

Le TOA a comme objectif l'étude de signaux sismiques associés à des phénomènes volcaniques. Cette étude est orientée dans des directions complémentaires : l'acquisition et l'interprétation des signaux précurseurs d'éruptions et la gestion des crises volcaniques.

J-P. Metaxian et P. Lesage (communication personnelle) s'intéressent à la localisation de la source des trémors volcaniques. On sait très mal localiser la source des séismes volcaniques émergents, des séismes longue période et des trémors. Ce problème est d'une grande importance, car ces signaux représentent, dans de nombreux cas, plus de la moitié de l'activité sismique pré-éruptive. Il a donc été nécessaire de développer des méthodes spécifiques pour localiser la source de ce genre de signaux.

Metaxian et Lesage utilisent une méthode qu'ils ont appelée « Goniométrie Sismique ». Elle est basée sur le calcul des délais temporels entre des signaux détectés par des micro-réseaux. L'idée est de déterminer dans plusieurs sites la direction de propagation des ondes. L'intersection de ces directions se trouve à la verticale de la source. La direction de propagation d'une onde peut être déterminée à partir des délais temporels entre les signaux détectés par un micro-réseau d'au moins trois capteurs. Ces capteurs peuvent être situés à quelques dizaines de mètres les uns des autres. Une bonne précision sur les valeurs des délais est obtenue en utilisant une méthode interspectrale développée pour l'étude des multiplets sismiques (Poupinet *et al.*, 1984). L'estimation simultanée de la vitesse apparente des ondes permet le calcul de l'angle d'incidence des ondes de volume, si l'on connaît la structure de vitesse. Ceci permet d'obtenir approximativement la profondeur de la source.

Cette méthode sera testée dans plusieurs contextes volcaniques afin d'en évaluer les performances et les limites. L'objectif final est de rendre la méthode opérationnelle et capable de localiser automatiquement et en temps réel les sources des signaux sismo-volcaniques émergents. Une première mission est prévue fin 96 sur le volcan Arenal (Costa Rica). Ce volcan a été choisi en raison de son activité éruptive permanente. Le volcan Tungurahua (Equateur) sera un deuxième site de test.

La gestion des crises volcaniques est un sujet assez sensible. En effet, au cours d'une période pré-éruptive le nombre d'événements sismiques observés peut devenir très grand. D'autre part, la forme des signaux peut varier rapidement au cours du temps. Il est difficile de traiter

rapidement une telle quantité d'information et de produire un diagnostic fiable sur l'évolution de la crise. Des méthodes de détection et de classification des signaux volcaniques doivent être développées pour une analyse du signal en temps réel et en continu.

L'intégralité du réseau TOA sera utilisée pour établir une sorte de carte d'identité sismique des volcans Cotopaxi et Tungurahua, en Equateur, et du volcan Misti, à Arequipa, Pérou. Il s'agit de définir un état de référence de l'activité sismique en période de repos. Ce travail préliminaire doit aussi permettre de choisir et de préparer différents sites par une étude détaillée de leur réponse. Ceci en vue de l'installation rapide d'un réseau d'intervention en cas de crise.

Le réseau TOA est utilisé actuellement par P. Gueguen (Orstom) pour une étude de micro-zonage de la ville de Quito, Equateur. Cette méthode consiste à faire des enregistrements de bruit sismique dans plusieurs sites urbains. L'application de la méthode de Nakamura (rapports spectraux) permet la caractérisation des sols en déterminant leur période fondamentale. Cette étude permettra la construction d'une carte de risque sismique pour cette ville.

Le TOA est un exemple d'un réseau mobile de surveillance. Il s'agit d'un cas d'étude intéressant pour évaluer les caractéristiques techniques des stations Sismalp 3. La basse consommation des stations permettra des tournées moins fréquentes, réduisant le coût des interventions. D'autre part, l'usage de l'enregistrement continu est obligatoire pour l'enregistrement des séismes d'origine volcanique. En effet, ce genre de phénomène est très difficile à détecter. Les signaux sont presque permanents (trémors), émergents ou de très longue période. Les données pourront être traitées automatiquement sur le terrain, grâce à la flexibilité de la station Sismalp 3 PC. Le programme peut être écrit par l'utilisateur avec un ordinateur de bureau et ensuite être installé dans la carte PC de la station. Enfin, les disques durs PCMCIA sont idéaux pour des applications sur le terrain. Ils ont une taille réduite, une basse consommation et ils peuvent être facilement insérés et extraits.

La mesure du bruit sismique dans des zones urbaines a été simplifiée par la basse consommation de la station. Plusieurs mesures ont été faites sans avoir besoin de recharger les batteries de la station (P. Gueguen, communication personnelle).

6.1.3 Le Centre d'Etudes de la Neige

L'un des objectifs du Centre d'Etudes de la Neige est la prévision des avalanches. Une étude de l'évolution du manteau neigeux est nécessaire pour déterminer les conditions préalables. Cette étude est faite à partir des observations sur le terrain recueillies par des pisteurs, ainsi que des informations fournies par le réseau de télédétection de Météo France. Toutes ces données sont traitées par des programmes experts contraints par certaines règles déterministes.

L'aspect le plus sensible de l'étude est la détermination de l'instant de déclenchement de l'avalanche. Jusqu'à maintenant, ceci était fait à partir des observations visuelles. Dans des conditions de bonne visibilité cette méthode est fiable. Dans le cas contraire, le déclenchement des avalanches peut passer inaperçu.

J-P. Navarre dirige un projet qui s'intéresse aux enregistrements sismiques des avalanches. Ce projet est orienté sur trois axes :

- la détermination du déclenchement d'une avalanche,
- la localisation de l'avalanche,
- l'étude des informations sismiques générées par l'avalanche.

Le troisième point est le sujet de thèse de B. Leprettre. Il a écrit un programme de reconnaissance du signal qui étudie trois caractéristiques du séisme : la forme, l'évolution temps-fréquence et la polarisation des ondes. Ce programme pourra éliminer des événements qui n'ont pas de rapport avec le phénomène d'avalanche : des séismes d'origine tectonique, des bruits générés par des humains, par l'orage, etc.

Une balise Sismalp 3 PC a été installée près de Saint Christophe en Oisans, en Isère, à 1600 mètres d'altitude. La station est connectée à une balise Météosat qui se charge d'envoyer des informations par satellite au site de Lagnon, en Bretagne. Ces informations sont transmises ensuite par ligne téléphonique au CEN, à Grenoble.

Le système Météosat octroie à chaque utilisateur un quota de 646 caractères toutes les heures. Cette contrainte rend impossible la transmission de l'intégralité des données par liaison satellite. Le PC de la balise Sismalp 3 PC est réveillée alors toutes les heures (commande WAKE) pour exécuter le programme de B. Leprettre. Le programme élabore une fiche de résultats qui respecte les contraintes de transmission. Les enregistrements qui n'ont pas été déclenchés par des avalanches sont ensuite effacés. Les données qui ont été sélectionnées peuvent être récupérées pendant une intervention sur le terrain.

Le projet du CEN a rencontré un problème qu'on n'avait pas prévu pendant le développement de la balise Sismalp 3 PC. En effet, le programme de reconnaissance du signal a besoin d'un microprocesseur très performant. La carte PC de la balise Sismalp 3 PC (80386 SX ou 80486) privilégie plutôt la basse consommation. La société Leas l'a remplacée par une carte PC conventionnelle, avec une grande puissance de calcul (80486DX). Cette modification n'a pas posé des problèmes, outre une consommation additionnelle d'énergie (30 W au lieu de 12 W).

6.2 Conclusions

Nous avons développé une station sismologique trois composantes en collaboration avec la société française LEAS S.A. Notre station peut être décrite par les caractéristiques qui suivent: grande dynamique, enregistrement continu et enregistrement par déclenchement, flexibilité, faible coût et basse consommation. On a appelé notre station Sismalp 3. Elle a été ensuite améliorée avec l'incorporation d'une carte PC. Cette nouvelle configuration a reçu le nom de Sismalp 3 PC.

La dynamique de notre station est celle du convertisseur analogique numérique utilisé : le convertisseur sigma delta AD7712. La fréquence d'acquisition de ce convertisseur peut être programmée entre 10 et 1010.5 Hz. Le gain de l'entrée peut être programmé entre 1 et 128. La dynamique du convertisseur est une fonction de ces deux variables. Avec un gain égal à 1, la dynamique est égale à 21 bits à 10 Hz, 18 bits à 100 Hz et 10 bits à 1010.5 Hz. Chaque voie dispose d'un convertisseur AD7712 indépendant des autres.

Deux modes d'acquisition sont disponibles : l'enregistrement par déclenchement (algorithme STA/LTA ou seuil fixe) et l'enregistrement continu. La mémoire de la station (2 Mo) peut être partagée pour avoir les deux modes d'acquisition de façon simultanée. Dans les deux cas, les données sont comprimées avant d'être enregistrées (algorithme delta). L'autonomie de la station se trouve autour de 1 heure par mega octet, grâce à l'algorithme de compression, pour une fréquence d'acquisition égale à 100 Hz et un gain programmable égal à 1. Dans la version Sismalp 3 PC, la carte PC est réveillée chaque fois que la mémoire est pleine, les données peuvent alors être vidées sur disque dur. Dans la version Sismalp 3, un effacement sélectif a lieu.

La flexibilité a été l'une des contraintes initiales de notre cahier des charges. Notre station a été conçue de façon à couvrir le spectre le plus large d'applications.

La station peut être entièrement contrôlée par ligne téléphonique. Les données peuvent ainsi être récupérées avec n'importe quel modem type Hayes. Des essais ont été faits avec un modem 14400 bps. Cette caractéristique, ainsi que sa basse consommation, fait de notre station le choix idéal pour des réseaux permanents, reliés par ligne téléphonique. Le réseau Sismalp en est un exemple.

La station Sismalp 3 peut aussi être utilisée comme station autonome dans des réseaux temporaires. Le même programme qui la contrôle par ligne téléphonique est installé dans un ordinateur portable pour établir un dialogue sur le terrain.

D'autre part, la version Sismalp 3 PC est idéale pour des applications où l'enregistrement continu est nécessaire. Les données sont vidées sur disque dur, chaque fois que la mémoire vive de 2 Mo est pleine. Ceci donne à la station une autonomie proportionnelle à la taille du disque dur. Un disque dur de 340 Mo permet autour de 340 heures d'enregistrement continu ($G = 1, f_{acq} = 100$ Hz). La carte PC permet aussi le traitement des données sur le terrain, avec des programmes écrits par l'utilisateur. On peut aussi connecter d'autres périphériques compatibles PC pour élargir les possibilités de la station. Une étude est faite actuellement pour déterminer la possibilité de connecter un enregistreur DAT (2 gigaoctets). On étudie aussi la connexion d'un téléphone mobile au modem de la station. Ceci permettra des communications téléphoniques même dans des endroits isolés.

La station Sismalp 3 est protégée par un boîtier en métal, solide et facile à transporter. Des joints en caoutchouc et des connecteurs spéciaux assurent l'étanchéité. Ce même joint a un fil métallique qui établit le contact électrique entre le couvercle et le reste du boîtier. Ce dispositif isole les cartes électroniques des radiations électromagnétiques externes.

La flexibilité de la station est mise à l'épreuve actuellement par plusieurs institutions qui l'utilisent dans des projets assez différents. Le réseau Sismalp utilise la version Sismalp 3 comme une station trois composantes au sein d'un réseau permanent relié par ligne téléphonique. L'Orstom a acheté des stations Sismalp 3 PC dans le contexte d'un réseau

destiné à des applications en sismotectonique et volcanologie. Ce réseau est actuellement utilisé pour faire une étude de microzonage dans la ville de Quito. Le Centre d'Etudes de la Neige utilise une station Sismalp 3 PC pour étudier les enregistrements sismiques des avalanches. Un programme de reconnaissance de signal, installé sur la carte PC de la station, traite les données ensuite pour éliminer des enregistrements non pertinents et obtenir des résultats qui sont transmis par Météosat.

Le réseau Sismalp dispose aussi d'un réseau mobile de 8 stations Sismalp 3 PC qui sera utilisé dans l'expérience Géo France 3D, le mois de juillet 1996. Plusieurs types de stations, monocomposantes et trois composantes, seront utilisées dans cette expérience. Toutes les caractéristiques qui définissent la qualité d'une station seront étudiées de façon comparative : la dynamique du convertisseur, la consommation, l'efficacité dans la détection, la construction de fichiers, les processus d'installation et maintenance, etc.

Le prix de la station Sismalp 3 est inférieur à celui d'autres stations équivalentes, construites en France ou à l'étranger. Des réseaux plus denses peuvent être ainsi construits avec le même budget.

La société LEAS S.A. a une grande expérience dans la construction d'instruments basse consommation. Ce critère est d'une grande importance dans l'instrumentation de terrain. Une basse consommation implique la diminution des opérations sur le terrain. La version Sismalp 3 consomme 60 mA à 12 V (720 mW). La version Sismalp 3 PC a une consommation permanente équivalente égale à 93 mA à 12 V (1.12 W).

La station Sismalp 3 est le résultat d'un projet de collaboration entre le laboratoire LGIT et la société LEAS. Les avantages de collaborer de façon étroite avec une société de la région sont évidentes. Le laboratoire a pu imposer des critères scientifiques sur un produit qui a du aussi satisfaire des critères commerciaux et financiers. L'évolution future du produit est assurée par le contact étroit entre les deux organisations. Cet avantage joue aussi au niveau de la maintenance et de la réparation des appareils.

La station Sismalp 3 s'insère dans le contexte d'un environnement informatique très efficace : la bibliothèque Sismalp. Cette bibliothèque inclut tous les logiciels nécessaires pour la gestion d'un réseau sismologique. Le programme Pickev permet la visualisation et le traitement des données sismologiques. La base des données permet la gestion rapide d'une grande quantité de données sismiques. L'appel d'un grand nombre de stations peut être géré de façon automatique. La bibliothèque Sismalp a été conçue par J. Fréchet et F. Thouvenot. Ils travaillent sur ces logiciels depuis l'année 1986. L'environnement choisi est le système d'exploitation MS-Dos sur PC.

Nous avons construit une expression analytique pour la réponse instrumentale de la station, à partir des spécifications techniques. Un capteur trois composantes a été étalonné avec une méthode qui utilise un signal binaire pseudo-aléatoire, généré par la station. La fonction de transfert du capteur a été trouvée avec une méthode interspectrale. Une procédure de minimisation qui utilise l'algorithme du simplexe a été utilisée pour ajuster les paramètres du sismomètre aux résultats expérimentaux.

Pour conclure ce travail, on peut affirmer sans crainte qu'un nouvel instrument a été fourni à la communauté sismologique française et internationale. Nous savons qu'il sera bien accueilli et qu'il saura s'adapter aux différents besoins de la recherche scientifique. La version disponible aujourd'hui a dépassé plusieurs étapes de test et de fiabilité, il s'agit donc d'un produit fini. Or, beaucoup d'améliorations sont encore possibles. Ces axes d'évolution seront explorés en fonction de la participation et de l'intérêt porté par les nouveaux utilisateurs. Cette ouverture nous permettra de comprendre notre instrument d'une autre façon et avec un autre regard. Nous croyons sincèrement que cette réaction sera déclenchée et qu'elle aura lieu avec créativité.

Références Bibliographiques

- Agecodagis, 1995. Titan seismological data recorders. Agecodagis S.A.R.L. Manuel technique.
- Aki, K. & P.G. Richards, 1980. *Quantitative seismology*, A. Cox, W.H. Freeman and Company, 557.
- Allen, R., 1982. Automatic phase pickers: their present use and future prospects, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, S225-S242.
- Althaus, M., 1992. *Le livre d'or. PC/XT/AT/386*, Sybex, 899.
- Analog Devices, 1994. *Design-in reference manual*, Analog Devices.
- Baer, M. & U. Kradolfer, 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**, 1437-1445.
- Bellanger, M., 1990. *Traitement numérique du signal. Théorie et pratique.*, Masson, 463.
- Berg, E. & D.M. Chesley, 1976. Automated high-precision amplitude and phase calibration of seismic systems, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66**, 1413-1424.
- Berger, J., D. Carr Agnew, R.L. Parker & W. Farrel, 1979. Seismic system calibration : 2. Cross-spectral calibration using random binary signals, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **69**, 271-288.
- Bernard, P., J.F. Karczewski, M. Morand, B. Dole & B. Romanowicz, 1991. The G-Calibration : a new method for absolute in situ calibration of long-period accelerometers, tested on the Streckeisen instruments of the Geoscope network, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, 1360-1372.
- Borland, 1992. Borland Pascal Objets. Guide du programmeur. Borland International. Guide du programmeur.
- Box, G. & G. Jenkins, *Time series analysis forecasting and control*.

- Caceci, M.S. & W.P. Cacheris, 1984. Fitting curves to data, *Byte*, 340-362, May.
- Chang Ching, M., 1984. Installation et étalonnage d'une station sismologique longue-période à Rennes. Acquisition et traitement du signal : application au séisme de Coalinga (Californie) du 2 mai 1983. Thèse, *Université de Rennes*.
- Chapman, M.C., J.A. Snoke & G.A. Bollinger, 1988. A procedure for calibrating short-period telemetered seismograph systems, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, 2077-2088.
- Crystal Semiconductor, 1992. *Analog/Digital conversion IC's*, Crystal Semiconductor Corporation.
- Dallas Semiconductors, 1990-1991. *Product data book*, Dallas Semiconductor, 936.
- Eva, C. & J. Virieux, 1992. Réseau sismologique "TGRS". Projet franco-italien d'étude et surveillance des tremblements de terre de la Mer Ligure. Université de Gênes. Université de Nice-Sophia Antipolis.
- Farrell, W.E. & J. Berger, 1979. Seismic system calibration: 1. Parametric models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **69**, 251-270.
- FDSN, I., USGS, 1993. SEED. Standard for the exchange of earthquake data. Federation of Digital Seismographic Networks. Incorporated Research Institutions for Seismology. United States Geological Survey. Manuel de référence.
- Fels, J.F. & J. Berger, 1994. Parametric analysis and calibration of the STS-1 seismometer for the IRIS/IDA seismographic network, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 1580-1592.
- Fels, J.F., 1995. Parametric analysis of the LE-3C Lennartz seismometer, September.
- Ferber, R.-G., 1989. Recursive deconvolution filters for seismograph systems, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **79**, 1629-1641.
- Fréchet, J., 1985. Sismogenèse et doublets sismiques, Thèse, *Université Joseph Fourier*.
- Fréchet, J. & F. Thouvenot, 1994. Bibliothèque Sismalp. Université Joseph Fourier. Centre National de la Recherche Scientifique. Observatoire de Grenoble. Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique de Grenoble.
- Glangeaud, F., 1992. La pratique de l'analyse spectrale assistée par Mustig. Centre d'études des phénomènes aléatoires et géophysiques. Cours universitaire, **33/92**.
- Gledhill, K.R. & M.J. Randall, 1986. SNARE : An earthquake detection and recording system for small seismograph networks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **76**, 1485-1489.
- Gledhill, K.R., M.J. Randall & M.P. Chadwick, 1991. The EARSS digital seismograph : system description and field trials, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, 1380-1390.
- Gomberg, J.S., P.A. Bodin & V. Martinov, 1988. Seismic system calibration using cross-spectral methods from *in situ* measurements: the Kazakh, USSR, Phase I Array, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, 1380-1386.
- Green, R.W.E., 1992. PC-based continuous recording field seismograph, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**, 497-504.
- Hatzfeld, D., 1995. Le réseau accélérométrique permanent., Document interne au Laboratoire de Géophysique et Tectonophysique de Grenoble, février 1995.
- Haubrich, R., 1965. Earth noise 5 to 500 millicycles per second; Part I, Spectral stationarity, normality and nonlinearity, *Journal of Geophysical Research*, **70**, 1415-1427.
- Heidenstrom, K., 1994. PC parallel port mini-FAQ. Reçu par Internet.
- Jenkins, G.M. & D.G. Watts, 1968. *Spectral analysis and its applications*, Holden Day.
- Konrad, R., 1970. Accelerometer calibration in the low "g" range by means of mass attraction *AIAA Paper, no. 1030*.
- Leas, 1987. Balise d'acquisition sismique. Sismalp 1, Leas, Notice technique.
- Leas, 1994. Caractéristiques générales. Balise d'acquisitions sismiques. Sismalp 3, Descriptif du produit.
- Leprettre, 1996. Conception d'une version opérationnelle du système S.A.R.A. Chapitre de thèse.
- Leprettre, B.N., J.-P. Danielou, Y. Panel, J.-M. Taillefer, A., 1995. Détection sismique des avalanches : conception et validation d'un système pré-opérationnel. ANENA. Colloque international "Neige et Sécurité".
- Mac Williams, F.J. & N.J. Sloan, 1976. Pseudo-random sequences and arrays, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, **64**, 1715-1729.
- Macchi, C. & J.-F. Guilbert, 1983. *Téléinformatique*, Dunod Informatique, 649.
- Mark Products Inc., Service Manual. Model L-4. Low frequency geophone.

Max, J., 1985. *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*, Masson, 344.

Microcom, 1993. *Carbon Copy. Guide l'utilisateur.*, Microcom., 320.

Mitronovas, W. & E. Wielandt, 1975. High-precision phase calibration of long-period electromagnetic seismographs, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**, 411-424.

Montagner, J.-P. & G. Roult, 1995. Geoscope program. Geoscope data center, I.A.S.P.E.I.,

Montagner, J.-P., P. Lognonné, J.-F. Karczewski, R. Beaudoin, G. Roult & E. Stutzmann, 1996. Towards a new generation of digital seismograph networks for the next century. Soumis à Tectonophysics, janvier 1996.

Moore, R.D. & W.E. Farrell, 1970. Linearization and calibration of electro-statically feedback gravity meters, *Journal of Geophysical Research*, **75**, 928-932.

Motorola, 1985. MC68HC11 Single-Chip Microcomputer. Motorola Semiconductor. Manuel technique.

Nedler, J.A. & R. Mead, 1965. A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, **7**, 308.

Norton, P., 1987. *Guia del programador para el IBM-PC*, Rei Editorial Iberoamericana, Andes Ltda., 462.

Oppenheim, A.V. & R.W. Schaffer, 1989. *Discret-time signal processing*, A. V. Oppenheim, Prentice-Hall, 879.

Pavlis, G.L. & F.L. Vernon, 1994. Calibration of seismometers using ground noise, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 1243-1255.

Poupinet, G., W.L. Ellsworth & J. Fréchet, 1984. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets : an application to the Calaveras fault, California, *Journal of Geophysical Research*, **89**, 5719-5731.

Poupinet, G., 1987. Seismic data collection platforms for satellite transmission in : *Seismic Tomography*, G. Nolet, editions, 239-250.

Poupinet, G., M. Pasquier, M. Vadell & L. Martel, 1989. A seismological platform transmitting via Meteosat, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **79**, 1651-1661.

Revilla, J., 1991. Réalisation d'une station centrale portable pour le réseau Sismalp. Université Joseph Fourier, Grenoble 1. Rapport de DEA Instrumentation et Mesures.

Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky & W.T. Vetterling, 1989. *Numerical recipes. The art of scientific computing*, Cambridge University Press, 702.

Revilla, J., 1991. Circuit de calibration pour le réseau Sismalp. Université Joseph Fourier. Projet d'électronique.

Rodgers, P.W., A.J. Martin, M.C. Robertson, M.M. Hsu & D.B. Harris, 1995. Signal-coil calibration of electromagnetic seismometers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, 845-850.

Romanowicz, B., J.F. Karczewski, M. Cara, B. P., J. Borsenberger, J.M. Cantin, B. Dole, D. Fouassier, J.C. Koenig, M. Morand, R. Pillet, A. Pyrolley & D. Rouland, 1991. The Geoscope program : present status and perspectives, *Bulletin of the Seismological Society*, **81**, 243-264.

Sauter, A.M. & L.M. Dorman, 1986. Instrument calibration of ocean bottom seismographs, *Marine Geophysical Researches*, **8**, 265-275.

Sibeuwou, B., 1994. Conception et réalisation d'une station sismique autonome de surveillance volcanologique à transmission par satellite. Thèse. Université de Savoie.

Steck, L. & J.W.A. Prothero, 1989. Seismic calibration using the simplex algorithm, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **79**, 1618-1628.

Tarbeyev, Y.V., Y.P. Krivtsov, A.Y. Sinelnikov & A.A. Yankovsky, 1994. A new method for absolute calibration of high-sensitivity accelerometers and other graviinertial devices, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 438-443.

Tischer, M., 1992. *La bible PC. Programmation Système.*, E. M. Application, 1545.

USRobotics, World Port Lite. Manuel d'utilisation. US Robotics. Manuel technique.

Wielandt, E. & G. Streckeisen, 1982. The leaf-spring seismometer: design and performance, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 2349-2367.

Wielandt, E. & J.M. Steim, 1986. A digital very-broad-band seismograph, *Annales Geophysicae*, **227-232**.

Willoughby, D.F., J.A. Orcutt & D. Horwitt, 1993. A microprocessor-based ocean-bottom seismometer, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**, 190-217.

Woodward, R.L. & G. Masters, 1989. Calibration and data quality of the long-period SRO/ASRO networks, 1977 to 1980, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **79**, 1972-1983.

L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1

**DÉVELOPPEMENT ET CALIBRATION D'UNE
STATION SISMOLOGIQUE TROIS COMPOSANTES**

José Javier REVILLA RONDÓN

**Observatoire de Grenoble
Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique**

RÉSUMÉ

Une station sismologique trois composantes, 24 bits, enregistrement continu, faible coût et basse consommation a été développée en collaboration avec une société française. L'instrument est entièrement contrôlé par ligne téléphonique, mais il peut aussi être utilisé de façon autonome.

L'architecture de la station inclut une carte PC. On dispose alors d'un véritable ordinateur au coeur de l'appareil. Le stockage de l'information est fait sur un disque dur PCMCIA (340 Mo). Un enregistrement sur carte flash ou sur DAT serait aussi possible. Des logiciels écrits par l'utilisateur peuvent être installés sur le disque dur pour traiter les données sur le terrain.

La communication téléphonique est faite avec des modems 14400 bps. La largeur de bande et le faible bruit électronique permettent l'utilisation de plusieurs types de sismomètres.

Une expression analytique de la réponse instrumentale de la station a été déterminée à partir des spécifications techniques. Le capteur trois composantes a été étalonné avec une méthode qui utilise un signal binaire pseudo-aléatoire. Une procédure de minimisation est utilisée pour ajuster les paramètres du sismomètre aux résultats expérimentaux. Ce processus de calibration peut être exécuté de façon périodique et automatisée.

MOTS CLÉS

Instrumentation : Station trois composantes ; Sismalp 3 ; Calibration ; Programme de communication ; Réseau sismologique.