

CNRS

le 31 Mars 1990

# VIRGO

## Rapport d'évaluation

---

---

A. Aspect, Ch. Bordé, B. Carter, P. Couturier, Fr. Dupont, J. Eisenstaedt,  
P. Fleury (président), N. Godet, R. Klapisch, J. Lequeux & R. Schaeffer

---



---

# VIRGO

## Rapport d'évaluation

---

- I. Résumés des conclusions et recommandations
  - II. Note de présentation
  - III. Note de synthèse
  - IV. Recommandations détaillées
  - V. Documents établis au cours de la mission :
    - A. Documents d'ensemble
    - B. Visites à l'étranger  
(NSF-Washington, SERC-Londres,  
INFN-Pise, Caltech & MIT, Garching)
    - C. Etudes par thèmes:  
(Astrophysique, Relativité générale,  
Sensibilité de VIRGO, Organisation)
- Pièce jointe: Organigramme "Pert"
- 

### Comité d'évaluation:

A. Aspect, Ch. Bordé, B. Carter, P. Couturier, Fr. Dupont, J. Eisenstaedt,  
P. Fleury (président), N. Godet, R. Klapisch, J. Lequeux & R. Schaeffer

---



## Table des matières

	Page
I. Résumé des conclusions et recommandations	7
II. Rapport de présentation	11
III. Note de synthèse	19
IV. Recommandations détaillées	29
V. Documents établis au cours de la mission:	35
A. Documents d'ensemble	36
B. Visites à l'étranger	51
C. Etudes par thèmes	71

### A. Documents d'ensemble

Désignation	Date	Page
1. Evaluation VIRGO: Note n° 1.	29 Nov.	36
2. Evaluation VIRGO: Note n° 2.	20 Janv.	37
3. Evaluation des coûts pour préétudes	30 Mars	41
4. Rapport au Conseil Scientifique IN2P3	10 Fév.	42

### B. Visites à l'étranger

1. Visite à Pise (13 Janvier)	18 Mars	51
2. Visite UK (2 Février)	9 Février	57
3. Visite USA (12, 13 et 14 Février)	25 Février	61
4. Visite à Garching (15 Mars)	18 Mars	67

### C. Etudes par thèmes

Désignation et Titre		Page
1. Physique et astrophysique. <i>Motivations Physiques et Astrophysiques (B. Carter, J. Lequeux &amp; R. Schaeffer)</i>	20 Mars	71
2. Relativité générale <i>La relativité générale face à l'expérience (J. Eisenstaedt):</i>	20 Mars	75
3. Sensibilité de VIRGO <i>VIRGO: la sensibilité de la métrologie laser (Cl. Fabre)</i>	6 Mars	77
4. A propos du rapport sur la sensibilité de VIRGO. <i>VIRGO: la sensibilité de la métrologie laser (discussion)</i>	24 Mars	81
5. Rapport du groupe de travail F.Dupont: <i>Rapport sur l'étude de l'organisation et du coût du projet VIRGO</i>	8 Février	83
<u>Pièce jointe:</u> Organigramme "Pert" pour la réalisation de l'antenne VIRGO	31 Mars	97



**Résumés**  
**Conclusions**  
et  
**Recommandations**

**I.**





## **Conclusions** **et** **Recommandations** **(Résumé)**

### **1) Le Projet VIRGO, son insertion dans un contexte national.**

Le Comité d'évaluation a tout d'abord examiné le dispositif expérimental proposé; le projet annonce une amélioration décisive dans la sensibilité de détection, et nous amène pour la première fois au seuil de crédibilité où l'on peut raisonnablement espérer détecter des événements d'intérêt astrophysique. **Le Comité, après cet examen approfondi, tient, pour l'essentiel, ces estimations pour crédibles.** Il est important de souligner que si, sur des points cruciaux, des tests ont déjà eu lieu en laboratoire, d'autres points importants dépendent de facteurs d'échelle qui ne pourront être étudiés qu'en vraie grandeur.

Le Comité porte une **appréciation positive sur la valeur des équipes française et italienne** qui, durant 4 ans de travaux en commun, ont donné naissance au projet. En particulier, le groupe d'Orsay apporte une contribution essentielle par ses travaux en métrologie laser qui font autorité au plan international. Ses compétences apparaissent ainsi comme complémentaires de celles de l'équipe italienne, leader mondial dans la réalisation de l'indispensable isolation sismique. Il nous paraît évident que le noyau initial de chercheurs français devra croître (doublement de l'effectif actuel) pour faire face aux multiples tâches que nécessitera le projet. Ce processus de croissance est normal et peut se faire par accréation de groupes provenant d'autres disciplines. A ce sujet, on doit signaler une prise de position récente du LAPP, à Annecy, dont plusieurs physiciens ont commencé des discussions en vue d'une insertion dans le projet. On peut remarquer qu'une évolution semblable s'est déjà amorcée en Italie par l'apport de physiciens des particules de Frascati, Pise et Naples.

**En ce qui concerne les coûts et délais du projet,** le Comité s'est livré à une réévaluation, sur la base d'une étude approfondie menée avec la pleine coopération des groupes franco-italiens. Nous pensons qu'une évaluation prudente se monte à 325 MF HT (valeur 1990) dont 75 MF de personnel (techniciens et ingénieurs) et 250 MF de construction, y compris 10 % d'aléas. Les délais de construction se montent à 5 ans.

Vu d'un **point de vue national**, le **projet apparaît comme porteur**, tant au plan de la **recherche fondamentale** dans plusieurs disciplines qu'à celui des retombées dans des **technologies industrielles d'avant-garde**. En ce qui concerne la recherche, on note qu'il s'agira d'un fascinant instrument d'optique dont la réalisation viendra conforter la position de pointe de notre pays en Optique Quantique ; la collectivité astrophysique est très bien préparée à mettre à profit l'ouverture de cette nouvelle fenêtre sur l'Univers; la forte tradition théorique en Relativité Générale ainsi qu'une implication qui s'annonce d'équipes de physiciens des particules, tout cela démontre qu'un engagement français dans cette discipline nouvelle aura des répercussions profondes sur l'ensemble de la communauté scientifique et universitaire nationale. Au plan appliqué et industriel, le projet ouvre des possibilités de réalisations d'avant-garde dans des domaines où l'industrie française est particulièrement bien placée: lasers YAG et leur asservissement, "super-miroirs" interférométriques de grande dimension etc..

## **2) Compétition / Coopération Internationale**

Le Comité s'est résolument placé dans la perspective de l'examen du projet franco-italien dans le contexte de la situation mondiale.

Notre première constatation est que **le projet VIRGO n'est en aucune façon inférieur** – ni dans sa conception, ni dans la crédibilité des équipes constituantes – aux projets américain (LIGO) et RFA-UK. La principale difficulté à notre avis vient des différences dans la crédibilité des délais de réalisation, eux-même largement liés à des hypothèses sur les schémas décisionnels et financiers dans les différents pays.

Notre deuxième constatation est liée à la nature scientifique des objectifs: la **première détection des ondes de gravitation est un objectif difficile en soi, prestigieux et qui conditionne toute la suite**. Cet objectif nécessite l'observation de **coïncidences entre deux antennes au moins**. Si l'Europe veut jouer un rôle de pionnier dans cette phase, elle doit donc disposer de deux antennes opérées en étroite collaboration. Deux antennes sans collaboration ou une collaboration pour une antenne unique auraient donc le résultat de réduire les efforts européens au rôle peu motivant de faire-valoir pour le projet américain.

Bien que les Américains avec leur projet unique d'un ensemble de deux antennes disposent d'une avance certaine sur le plan décisionnel, les incertitudes sur les facteurs de qualité scientifique des différents projets nous font apparaître comme très ouverte l'issue de cette compétition, à condition qu'une politique résolue permette à l'Europe de prendre place dans ce domaine porteur d'important développements.

**3) Nous recommandons donc que le projet franco-italien VIRGO soit approuvé dans les meilleurs délais. A cette fin, nous préconisons la mise en place d'un Institut franco-italien pour l'Etude des Ondes Gravitationnelles. Parallèlement nous recommandons la mise en place d'un Comité Européen destiné à promouvoir la coopération la plus étroite possible entre les deux projets européens.**

Compte tenu des délais qu'implique toute discussion à l'échelle internationale, nous recommandons que le CNRS attribue des crédits pour accélérer les tests en cours et pour aboutir d'ici une année à un "projet conceptuel détaillé", en escomptant qu'un effort semblable puisse être fait par l'INFN. Les processus de prise de décisions à tous les niveaux devront se dérouler parallèlement.



**Rapport d'évaluation**  
du  
**Présentation**

**II.**



**Comité d'évaluation  
de VIRGO**

## Présentation du Rapport

### Introduction

La Comité d'évaluation du projet VIRGO a été mis en place, fin Novembre 1989, par les directions du CNRS et de l'INSU, avec mission de déposer un rapport sous quelques mois.

Les membres de ce comité sont:

A.Aspect	Lab.de Spectr.Hertzienne, ENS-Paris 6, et Collège de France.
Ch.Bordé	Lab.de Physique des lasers, Univ.Paris 13.
B.Carter	Obs.de Paris-Meudon, Meudon.
P.Couturier *	Direction de L'INSU, Paris.
Fr.Dupont	Lab.de l'Accélérateur Linéaire, LAL-Orsay.
J.Eisenstaedt	Lab.de Physique Théorique, Institut Henri Poincaré, Paris.
P.Fleury #	Lab. de Phys.Nucl.des H <sup>tes</sup> Energies, LPNHE Ecole Polytechnique, Palaiseau.
N.Godet *	Dir.de la Prog.et de la Prévis.Budget., CNRS, Paris.
R.Klapisch	CERN, Genève.
J.Lequeux	Lab.de Radio Astrophysique, ENS Paris.
R.Schaeffer	Phys.Théor. CEA, L'orme des merisiers.

En outre, Cl.Fabre (Lab.de Spectr.Hertzienne, ENS-Paris 6) a fait un rapport devant le comité.

Par cette note de présentation nous visons à rendre aussi accessible qu'il est possible le résultat de notre enquête. Nous évoquons d'abord la méthode de travail que nous avons adoptée (ou disons plutôt, la justification après-coup de notre démarche). Nous donnons ensuite le calendrier des activités relatives à l'enquête: réunions, groupe de travail, visites à l'étranger. Nous donnons enfin quelques explications sur la forme du rapport final.

\* Observateurs: directions CNRS et INSU

# Président désigné du Comité d'évaluation

## I. Méthode de travail du Comité

A) Ayant pris acte, dès notre première réunion (voir Note n°1), de l'importance scientifique des enjeux, nous avons voulu disposer d'un délai suffisant avant de déposer le rapport, sans pour autant "geler" toute action éventuelle.

- Dans ce but, nous avons établi au cours de ces quelques mois plusieurs notes que nous avons transmises, et un rapport a été présenté par P.Fleury, le 2 Mars 1990, au Conseil Scientifique de l'IN2P3. Ces documents figurent in extenso dans le dossier que nous présentons \*.

- Nous avons par ailleurs suggéré, ou encouragé, quelques actions et principalement la mise en place d'un comité franco-italien qui puisse prendre le relais de l'activité du comité d'évaluation. Notons aussi qu'au cours de ces quelques mois, le groupe du projet a pu élargir ses contacts avec diverses collectivités scientifiques nationales (en particulier avec le LAPP d'Annecy).

B) Le Comité a tenu à travailler en bonne concertation avec l'équipe du projet. Nous avons visité leur laboratoire à Orsay, recueilli leur avis à propos de divers documents émis et nous les avons invités à assister à quelques unes de nos réunions. Ils ont été associés aux visites faites à l'étranger. Enfin, ils ont participé activement au groupe de travail animé par F.Dupont. Nous souhaitons dire ici, qu'au-delà d'une phase brève de rapports circonstanciés, ce travail en commun a pu être mené avec le plus total souci de clarté, de part et d'autre.

C) Nous avons tenu à ne pas circonscrire notre enquête au seul plan français.

- VIRGO est un projet de collaboration avec un groupe italien. Quatre membres du comité sont allés à Pise, dès le 13 Janvier 1990, prenant occasion d'une réunion franco-italienne du groupe de projet.

- VIRGO constitue le moyen de l'éventuelle participation française au programme international d'antennes interférométriques qui se met actuellement en place. Au double titre de compétition et de nécessaire concertation (pour la mise-en-évidence de signaux par coïncidences), VIRGO doit être envisagé dans ce contexte. Nous nous sommes efforcés, en particulier par des contacts directs tant en Europe qu'aux USA, de comprendre la dynamique actuelle.

.....

---

\* Une confrontation attentive de ces textes - en tenant compte des dates - avec nos conclusions finales ferait apparaître quelques nuances, traduisant notre évolution dans le sens d'une plus totale détermination en faveur du projet.



## II. Calendrier: Réunions, Groupe de travail et Voyages

Mise en place du comité par une note du 7-Nov.1989

**20 Nov.** (en présence de A.Brillet et P.Tourrenc)

- Présentation du dossier par P.Couturier puis A.Brillet,
- Rédaction de la Note n° 1 (*Note du 29 Nov. v. Doc. d'ensemble [1]*).

**18 Déc.**

- Les évaluations des sources cosmiques (B.C., J.L., R.S.)

Une note est déposée, note réactualisée en Février puis en Mars (*v. Etudes par thèmes [1]*)

La discussion porte sur le nombre d'antennes souhaitables, selon qu'on se place dans la perspective de la seule mise-en-évidence des Ondes de Gravitation ou qu'on envisage l'exploitation astronomique.

- Un schéma de travail est proposé (F.D.) pour l'examen critique des chiffrages du projet; un groupe de travail est mis en place (F.D., P.F.).

**5 Janv.** (en présence de A.Brillet et C.N.Man et A.Marraud)

- Réunion restreinte consacrée à l'exposé du travail du groupe F.D..

Le groupe de travail a rencontré sur environ une quinzaine d'heures les membres du projet (A.B., C.N.M. et A.M.). L'évaluation technique et financière faite par l'équipe VIRGO a paru plus solide que nous ne le pensions; les chiffrages nous ont semblé néanmoins un peu trop bas. L'étude a fait l'objet d'un rapport de F.D.\* (*v. Etudes par thèmes [5]*).

- Nous traitons à part l'aléa industriel lié à la construction des grands super-miroirs; Ch.B. se charge d'enquêter sur ce point.
- Une discussion impromptue s'engage sur la nécessité qu'il y aura à désigner un chef unique de projet (point de vue accepté par A.B.).

**13 Janv. Visite à Pise**

*P.C., F.D., P.F., & R.K*

*Nous avons rencontré l'ensemble du groupe VIRGO, l'équipe italienne et l'équipe française. Se sont en outre associés aux discussions: Rino Gastaldi, directeur du laboratoire, et Paolo Strolin, président du Comité d'Expérience (II) de l'INFN (v. Visites [1]).*

**23 Janv.**

- Présentation du rapport F.D. et discussion.
- Rapport présenté par Ch.B. sur la réalisation industrielle des grands super-miroirs.
- Commentaires sur la visite à Pise le 13-1-1990 (*v. Visites [1]*).
- Discussion sur le projet de la Note n°2 (*v. Documents d'ensemble [2]*).

---

\* *Ultérieurement, l'étude a été prolongée par l'établissement d'un "organigramme Pert", réalisé conjointement avec l'équipe du projet et avec la contribution de Hevin (du LAL-Orsay) (v. pièce jointe).*

**2 Fév. Visite à Londres**

*P.F., accompagné de Ph.Tourrenc et de Jacques Bordé (représentant du CNRS à Londres), auprès de I.Corbett et J.Hough (v. Visites [2] ).*

**8 Fév. (en présence de A.Brillet et C.N.Man, A.Marraud et Ph.Tourrenc)**

Cette réunion s'est tenue dans les locaux de l'équipe de A.Brillet à Orsay; elle a été précédée d'une visite du laboratoire.

- Commentaires sur la rencontre à Londres avec I.Corbett et J.Hough.

- Discussion sur le projet de la note de P.F. pour le Comité Scientifique de l'IN2P3 à sa réunion du 2 Mars (*v. Doc. d'ensemble [3]*).

**12, 13 & 14 Fév., visite au MIT, au Caltech et auprès de la NSF**

*P.F, accompagné de A.B. (v. Visites [3] ).*

**21 Fév., Visite auprès du Max Planck de Garching (Munich)**

*A.A., discussion avec H.Walther .*

**6 Mars**

- Rapport de Cl.Fabre sur les limites de sensibilité dans la métrologie interférentielle de VIRGO (*v. Etudes par thèmes [3 & 4]* )

- Commentaires sur la visite de P.F., accompagné de A.B., au MIT, au Caltech et auprès de la NSF.

- Commentaires sur la discussion de A.A. avec H.Walther au Max Planck de Garching.

- Elaboration du rapport final.

**15 Mars, Visite auprès du Max Planck de Garching (Munich)**

*P.F., accompagné de A.B. & Ph.T. (v. Visites [4] ).*

**20 Mars**

Discussion des "Recommandations".

J.Eisenstaedt: VIRGO dans le contexte de la relativité générale (*v. Etudes par thèmes [2]* ).

Commentaires sur la visite de P.F. à Garching.

**31 Mars**

Dernières mises aux points:

Clôture du rapport d'évaluation VIRGO.

.....

### III. Organisation du rapport du comité

Bien que nous nous soyons octroyé quatre mois pleins pour notre évaluation, il ne nous a pas paru possible de rédiger un rapport de style académique, sauf à rallonger encore - sans utilité évidente - les délais.

Nous avons donc choisi, au lieu d'un document d'ensemble rédigé d'une seule main, de présenter notre travail sous la forme d'une compilation ordonnée des notes, des rapports thématiques et des comptes-rendus de visites à l'étranger, qui ont été rédigés au cours de ces 3 mois.

L'énoncé de nos "recommandations" fait l'objet d'un document séparé que nous avons voulu suffisamment long (5 pages, mais nous lui avons adjoint un résumé) pour qu'il puisse être diffusé indépendamment de l'ensemble, sans trop de préjudice pour la compréhension des présupposés.

Enfin, nous avons établi une note de synthèse.

Le rapport du comité d'évaluation VIRGO comporte les pièces suivantes:

Désignation	Date	Nb.pages
I. Résumé des conclusions et recommandations	31 Mars	2 p.
II. Rapport de présentation	26 Mars	6 p.
III. Note de synthèse	31 Mars	9 p.
IV. Recommandations détaillés	26 Mars	5 p.
V. Documents établis au cours de la mission d'évaluation:		
A. Documents d'ensemble		
B. Visites à l'étranger		
C. Etudes par thèmes		

### A. Documents d'ensemble

Désignation	Date	Nb. pages
1. Evaluation VIRGO: Note n° 1.	29 Nov.	1 p.
2. Evaluation VIRGO: Note n° 2.	20 Janv.	4 p.
3. Evaluation des coûts pour préétudes	30 Mars	1 p.
4. Rapport au Conseil Scientifique IN2P3	10 Fév.	8 p.

### B. Visites à l'étranger

Désignation	Date	Nb. pages
1. Visite à Pise (13 Janvier)	18 Mars	5 p.
2. Visite UK (2 Février)	9 Fév.	3 p.
3. Visite USA (12, 13 et 14 Février)	25 Fév.	6 p.
4. Visite à Garching (15 Mars)	18 Mars	3 p.

### C. Etudes par thèmes

Désignation et Titre	Date	Nb. pages
1. Physique et astrophysique. <i>Motivations Physiques et Astrophysiques</i> (B. Carter, J. Lequeux & R. Schaeffer)	20 Mars	4p.
2. Relativité générale <i>La relativité générale face à l'expérience</i> (J. Eisenstaedt):	20 Mars	5p.
3. Sensibilité de VIRGO <i>VIRGO: la sensibilité de la métrologie laser</i> (Cl. Fabre)	6 Mars	4p.
4. A propos du rapport sur la sensibilité de VIRGO. <i>VIRGO: la sensibilité de la métrologie laser (discussion)</i>	24 Mars	2p.
5. Rapport du groupe de travail F. Dupont: <i>Rapport sur l'étude de l'organisation et du coût du projet VIRGO</i> (F. Dupont)	8 Fév.	14p.
<u>Pièce jointe:</u> Organigramme "Pert" pour la réalisation de l'antenne VIRGO	31 Mars	5p.

## Note de Synthèse

### III.



## Rapport du Comité d'évaluation

# Note de synthèse

### Introduction

Cette note de synthèse se présente comme l'ébauche de ce qu'aurait pu être le rapport d'évaluation proprement dit, si nous avions adopté la forme d'un document global. Dans une première partie, nous rappelons les caractéristiques essentielles du projet VIRGO. Nous évoquons ensuite l'équipe - ou les équipes - du projet, et leur organisation en vue de la réalisation de l'antenne. En troisième partie, VIRGO est envisagé en tant que projet "porteur" vis-à-vis de plusieurs domaines de recherche et de technologie. Dans une dernière partie, la compétition et/ou concertation internationales pour la détection d'ondes de gravitation est évoquée, principalement le projet US de deux antennes et le projet RFA-UK pour une antenne.

### I. Descriptif de VIRGO: Enjeux et Méthodes

La description très succincte que nous faisons ici du projet VIRGO est surtout occasion de rappeler quelques chiffres, et occasionnellement de souligner certaines spécificités du projet VIRGO; "*pour en savoir plus*" on pourra utilement se reporter au rapport vert du projet.

#### **Par rapport aux cylindres de Weber**

- un gain potentiel de  $\approx 10^3$  en sensibilité
- une grande bande passante ( $\approx 10$  à  $\approx 10^3$  Herz)

#### **Taux de signaux cosmiques escomptés:**

(Voir études par thèmes n°1)

- Coalescence de binaires (jusqu'à des distances de 100Mpc): *quelques événements par an*
- Super-Novae (jusqu'à des distances de 10Mpc): *quelques événements par an*
- Pulsars (jusqu'à des distances de 10Kpc): problématiques, au moins dans la phase initiale car leur détection implique une analyse sur une longue période (plusieurs mois).

### Principe du détecteur: un interféromètre de Michelson

Ci-dessous, nous notons, en plus petits caractères, les éventuelles différences avec les projets concurrents.

- source de lumière: un laser YAG (1,06  $\mu$ ) asservi en fréquence et puissance.

Les projets concurrents comportent un démarrage avec un laser à Argon; la compétence acquise par l'équipe sur les YAG autorise, d'entrée de jeu, le recours à cette technologie qui semble actuellement la plus prometteuse.

- deux bras de 3 km à 90°.

La même longueur est retenue pour le projet RFA-UK, mais le projet US prévoit une longueur de 4 km.

- allongement du parcours par repliement du faisceau: comme pour le projet LIGO, ce repliement est réalisé par des cavités Fabry-Perot (de finesse  $\approx 50$ ).

Le projet RFA-UK juge plus sûr de recourir dans un premier temps à une méthode de réflexions successives discrètes (méthode de "ligne à retard").

- amplification de puissance par recyclage de la lumière (facteur  $\approx 40$ ),

- mesure hétérodyne du signal d'interférence (précision de  $\approx 10^{-10}$  radian).

L'utilisation du recyclage implique le recours à une modulation HF qui soit extérieure au faisceau principal.

- suspensions antisismiques au niveau de  $10^{-9}$  en horizontal ( $10^{-7}$  en vertical).

Ces performances ont été vérifiées sur les prototypes de suspension vraie grandeur; les autres projets préfèrent ne pas recourir au début à des dispositifs aussi sophistiqués que ceux déjà réalisés à Pise.

### Etat des travaux

- trois projets sont actuellement en discussion au niveau international,

- les principaux paramètres paraissent sous contrôle à l'échelle d'expériences de labo,

- des niveaux de sensibilité de  $\approx 10^{-18}$  ont été réalisés - par d'autres groupes que VIRGO - sur des antennes prototypes (ce qui est comparable aux performances actuelles des cylindres de Weber). La sensibilité escomptée, de  $10^{-21}$ , ne pourra être validée qu'avec une grande antenne (v. études par thèmes n°3 & 4).

- le groupe VIRGO dispose d'une compétence largement reconnue sur les points clefs (même s'il lui manque peut-être l'expérience de grands projets).

.....



## II. Equipes VIRGO, Organisation du projet

### L'équipe d'Orsay

Nous associons ici, à l'équipe installée dans les locaux du CSNSM, celle constituée de J.Y.Vinet et P.Hello du laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) de l'Ecole Polytechnique.

- Forte "image de marque" au niveau international, ce que nous avons pu très clairement percevoir à l'occasion des diverses visites à l'étranger.

- Des "premières":

- a) sur le recyclage,
- b) sur les asservissement en fréquence et puissance de lasers YAG,
- c) en modulation HF externe (détection hétérodyne),
- d) en simulations numériques de l'optique du faisceau principal (Vinet & Hello)...

- Des liaisons fortes avec les industriels, et des contrats européens sont actuellement négociés

- a) asservissement des lasers YAG : *MBB, BMI*
- b) pompage par diodes des lasers YAG
- c) caractérisation des supermiroirs : *Sagem, Matra, CMO-LETI*

- L'équipe est efficace, mais trop peu nombreuse pour la phase de réalisation de VIRGO.

- Les contacts avec d'autres collectivités scientifiques nationales se développent.

- a) avec des laboratoires d'Optique et de Laser (Ec.de Phys.&Chimie, ENS Paris 6, Inst. d'Opt.)
- b) avec des laboratoires de l'IN2P3, en particulier avec le LAPP à Annecy.

### Le "GROG" et l'exploitation astrophysique

Le rattachement administratif au laboratoire de Physique Théorique de l'Institut Henri Poincaré, ainsi que le soutien très déterminé du projet VIRGO par Ph.Tourrenc, directeur de ce laboratoire, ont été d'un intérêt vital pour le groupe d'Orsay.

Ce rattachement inhabituel d'une équipe expérimentale au sein d'un laboratoire théorique aura eu l'avantage de faciliter les liaisons avec les collectivités de chercheurs en Relativité Générale et, par là, avec l'Astrophysique.

Une structure a été créée pour favoriser et développer cette concertation, le GROG, ou Groupe de Recherche sur les Ondes de Gravitation. Il s'agit principalement d'un groupe de discussions dont il serait très souhaitable qu'en émane une équipe directement associée à la réalisation de VIRGO, avec la responsabilité de préparer les analyses en temps réel.

### **L'équipe de Pise**

*(Voir note sur la visite à Pise)*

Sous le terme d'équipe de Pise nous désignons ici, un peu abusivement, les quelques 20 physiciens de Frascati, de Naples et de Pise qui se sont associés au groupe dirigé par A.Giazotto.

Le travail a été fait principalement à Pise, avec la réalisation de deux suspensions antisismiques vraie grandeur dont les principes sont originaux et les performances remarquables.

En outre, une étude sur le système de vide a été faite en commun par les équipes de Pise et d'Orsay, avec réalisation d'un prototype de tube (sur 2 fois 12 m).

### **Equipes d'autres pays souhaitant être associés au projet**

*(Voir note sur la visite à Pise)*

- Une petite équipe, autour de Lee Holloway de L'Univ.of Illinois Urbana-Champaign (USA), souhaite participer, en apportant un financement à hauteur de leur contribution technique (pilotage des miroirs). Des liens étroits étant établis de longue date avec Pise, ceci n'a pas paru trop hasardeux.

- Un ensemble de laboratoires brésiliens souhaite aussi être associé, sur une base plus globale aux plans techniques et financiers. Cette participation ne nous a pas paru aller de soi.

### **Site - Répartition des tâches - Structure administrative**

*(Voir note sur la visite à Pise)*

Perçu jusqu'à une date très récente comme un projet financé majoritairement par l'INFN (sans qu'il y ait eu d'ailleurs d'engagement en ce sens), le principe d'un site en Italie a été considéré comme allant de soi. Un terrain est proposé à Cascina, près de Pise qui paraît convenir du point de vue des bruits sismiques et des bruits résultant d'activités humaines. Ce site a en outre le très grand avantage d'être aisément accessible depuis le laboratoire de Pise. Les autorités locales ont donné leur accord pour l'acquisition aux fins d'implantation de VIRGO, mais d'ici 6 mois cet accord sera caduc et devra donc être renégocié.

La répartition des tâches entre le côté italien et le côté français paraît quasiment aller de soi:

- côté italien: les suspensions antisismiques, le génie civil,
- côté français: l'optique (laser, interférométrie, miroirs),
- restent en interface: le système de vide et l'informatique de saisie des données.

Le poids du laboratoire de Pise, dans l'hypothèse d'un site à proximité, serait sans doute prépondérant au moins pour la période de construction. Pour faciliter la gestion, il serait d'ailleurs préférable que le "laboratoire VIRGO" soit un groupement de droit italien, et que, dans une toute première phase, cette entité soit gérée par le laboratoire de Pise. Dans cette éventualité, des garanties devront être définies pour préserver les intérêts du contractant français. En tout état de cause, maintenant que l'équilibre des financements semble être devenue l'hypothèse envisagée, tout ce qui vient d'être évoqué doit être rediscuté sur des bases différentes.

### **Elaboration détaillée du projet de construction de VIRGO**

*(Voir rapport F.Dupont, et le diagramme "Pert")*

Sur la base d'une réflexion par les membres de l'équipe de projet, et d'un travail déjà très élaboré, comportant entre autres diverses enquêtes techniques auprès d'industriels sur le système de vide, une évaluation détaillée des charges - en terme des coûts et des délais - a pu être menée à terme au cours de ces derniers mois. L'outil de cette évaluation a été un diagramme "Pert" que nous joignons au rapport; l'étude a été menée principalement par A.Marraud de l'équipe d'Orsay, Dupont et Hévin du LAL. Cette étude comporte, de notre point de vue, plusieurs intérêts:

- valider le calendrier d'une réalisation sur 5 ans,
- définir les préétudes qu'il faut pouvoir financer sans attendre la décision d'ensemble,
- préparer les discussions à venir sur l'organisation pour la réalisation du projet.

### **III. VIRGO, projet "porteur"**

#### **Intérêts pluri-disciplinaires**

- Physique des particules, Astrophysique et Relativité générale

*(voir Etudes par thèmes 1&2)*

- Optique quantique et Lasers

*(voir Etudes par thèmes 3 & 4)*

VIRGO constitue du point de vue de l'optique un système expérimental exceptionnel, par l'imbrication des diverses cavités (la cavité de recyclage englobe les deux cavités de Fabry-Perot), par la puissance qui est ainsi stockée, par les très hautes précisions de la stabilisation en fréquence rendue possible du fait de la longueur des bras de l'antenne etc... La compréhension même de ce système optique est de nature à focaliser l'attention de chercheurs qui souhaiteront être associés à la phase initiale de mise-au-point et aux phases ultérieures de développement (par exemple pour les tests sur le "squeezing").

#### **"Retombées" technologiques**

- Asservissement des laser YAG,
- Pompage par diodes des lasers YAG,
- Super-miroirs de grandes dimensions: les miroirs à très haute réflectivité sont obtenus par dépôts de diélectriques alternés en couches minces. Développés en particulier pour les gyroscopes à laser (les gyro-lasers), ils sont disponibles auprès de plusieurs industriels mais les dimensions nécessaires pour VIRGO sont plus grandes. La SAGEM est sans doute particulièrement bien placée pour cette réalisation, et peut-être aussi Matra. Mais il ne faut pas ignorer d'autres partenaires non industriels. En particulier, le "CMO" du LETI est informé de ce projet et pourrait contribuer utilement, par exemple au niveau de prototypes; un intérêt de la DRET, pour des miroirs néanmoins un peu différents, a été évoqué.

## IV. Contexte international

### Les USA: le projet LIGO

*(Voir note sur la visite aux USA)*

Sous l'impulsion de M.Bardon et avec le plein soutien de E.Bloch, respectivement responsable de la Physique et directeur de la NSF, le projet "LIGO" comportant deux antennes (une à l'Est l'autre à l'Ouest du continent) est actuellement soumis à l'approbation du Congrès. Déjà depuis 1987, à l'instigation de la NSF, les deux équipes du Caltech et du MIT se sont placées sous l'autorité d'un unique directeur de projet. Si, à notre avis, les études préliminaires sont au moins aussi bien engagées du côté de VIRGO, force est de constater que LIGO dispose déjà, au Caltech, d'une base de travail bien structurée (locaux remis à neuf, labos, début d'une équipe technique, ...).

L'enjeu d'un projet à deux antennes est évidemment de pouvoir valider les signaux par coïncidence - indépendamment de toutes autres antennes - . Néanmoins la NSF multiplie les initiatives pour promouvoir une concertation internationale en vue de réaliser dès que possible le vaste réseau d'antennes qu'exigera l'observation astronomique pour la localisation des sources cosmiques. Les partenaires des deux projets européens - dont aucun n'est assuré - répondent d'autant plus volontiers à ces initiatives que chacun des deux groupes doit au moins envisager l'hypothèse qu'il y aura une seule antenne en Europe. En bref, les USA, pour l'instant, mènent le jeu et les Européens s'y associent en ordre dispersé.

### Le projet RFA-UK

*(Voir notes sur les visites à Londres et à Garching)*

Le projet RFA-UK associe principalement les équipes de Glasgow et de Garching. Une équipe de Hanovre est aussi associée et son poids devrait s'accroître si le site est choisi dans cette région. Bien que la RFA assurera la plus grosse part du financement, le laboratoire de Rutherford, en tant que labo de soutien logistique, est appelé à un rôle d'autant plus important que les laboratoires de Glasgow, Garching et Hanovre ne disposent pas de services techniques. Cette fédération comporte donc quelques fragilités; les mois à venir seront sans doute critiques pour la mise en place d'une structure viable.

Néanmoins - et tel n'est pas encore le cas pour VIRGO - le processus de décision paraît solidement engagé; un groupe a été nommé conjointement par les deux pays pour en élaborer les modalités et un accord de principe est escompté d'ici l'été 1990.

Les contacts que nous avons eus tant à Londres qu'à Munich ont été extrêmement cordiaux. Notre plaidoyer pour une plus forte concertation européenne n'a pas été recusé dans son principe; néanmoins, pour l'instant, la volonté d'aboutir sans délai à un accord RFA-UK l'emporte sur toute autre considération.

### **Compétition et/ou Collaboration**

Le premier enjeu du programme qui s'engage pour les antennes interférométriques est bien évidemment d'établir la réalité des ondes de gravitation et surtout d'atteindre la sensibilité nécessaire. L'approche retenue, en principe, aux USA d'un projet unique à deux antennes est la plus adéquate. La meilleure façon pour l'Europe de participer, à part égale, dans cette aventure aurait été de se doter aussi d'un projet à deux antennes; mais, le regroupement sur l'unique projet LIGO remonte à 1987, il est donc bien tard pour s'engager dans cette voie. Il faudrait tout au moins une très forte concertation entre les deux projets d'antennes européennes - en espérant qu'il y en ait deux - pour que l'Europe ne soit pas réduit au rôle peu stimulant de faire-valoir vis-à-vis du LIGO.

### **Fédération d'équipes ou Organisation centralisée**

Bien que les contacts aient été nombreux depuis plusieurs années déjà entre les divers groupes intéressés aux projets d'antennes, ce n'est pas par quelque maléfice qu'aucun projet global à deux antennes n'a été proposé. Ce fut au contraire une position de principe qui paraît avoir été quasi-unanime. Les arguments contre un projet global, d'ailleurs, resteraient aujourd'hui convaincants si la NSF n'avait pas pris l'initiative de brusquer le jeu. L'optique quantique est actuellement un domaine où théorie et savoir-faire restent très imbriqués; c'est le domaine de petites équipes, souvent dynamiques et inventives, manipulant, en orfèvres, des objets fragiles. Déjà, le fait de s'associer par fédération avec d'autres équipes de profil similaire est perçu comme un risque. L'idée d'un grand projet, dont le leadership pourrait échoir à un non spécialiste, est plus choquante encore.

Ces points de vue ne sont en aucune façon déraisonnables; peut-être même, la stratégie choisie par la NSF est-elle prématurée, voir même erronée. Néanmoins, on ne peut ignorer la dynamique ainsi créée; il faudra bien en débattre.

.....

## Conclusions

La gravitation a été un thème largement délaissé de la recherche expérimentale dans l'hexagone. Faut-il se féliciter de n'avoir pas participé aux recherches sur la cinquième force qui, il est vrai, ne semblent pas déboucher? En ce qui concerne les ondes de gravitation, rien ne prouve non plus qu'il eût fallu persévérer dans le programme sur les cylindres de Weber, entrepris vers 1970 à Meudon. Néanmoins, si la cinquième force a toujours été hautement spéculative, il n'y a par contre guère de doute en ce qui concerne l'existence des ondes de gravitation, en particulier depuis les travaux récents sur l'accélération du pulsar PSR 1913+16.

La mise en évidence directe des ondes de gravitation constitue en soi un enjeu de toute première importance, ouvrant potentiellement la voie à une astronomie gravitationnelle. Cette recherche, initialisée par J. Weber aux USA dans les années 1970, est restée à ce jour sans résultat, mais les détecteurs s'améliorent, et l'écart entre leur niveau de sensibilité et celui des signaux cosmiques raisonnablement escomptés s'amenuise. L'émergence d'un nouveau type de détecteur - interféromètre de Michelson à laser - est actuellement l'occasion, au niveau international, d'un large programme d'investissement, avec déjà en perspective la constitution d'un vaste réseau planétaire d'antennes d'observations astronomiques.

L'équipe d'Orsay engagée dans cette voie depuis 1982 apporte au CNRS - de par sa compétence largement reconnue - la caution scientifique permettant d'envisager une participation immédiate à ce vaste programme. Certes, l'équipe initiale est trop peu nombreuse et doit donc être renforcée; mais, récemment, des chercheurs du laboratoire de l'IN2P3 à Annecy (le LAPP), ont engagé avec l'équipe des discussions en vue d'une étroite association.

La collaboration avec le groupe de l'INFN de Pise (It.) pour la réalisation de VIRGO, presque "rodée" par 4 années de travail en commun, nous paraît engagée sur une bonne voie. La répartition des tâches est assez bien définie; le groupe de Pise a conçu un dispositif original pour les suspensions antisismiques et réalisé deux prototypes vraie grandeur dont les performances sont très remarquables (conférant à VIRGO la possibilité d'exploiter le domaine des basses fréquences à partir de 10 Hz). Le groupe de Pise apporte, de par l'expérience acquise auprès des grands accélérateurs, une certaine expertise en ce qui concerne la réalisation d'un grand projet. L'Italie propose un site qui paraît approprié et d'accès très facile depuis le laboratoire de Pise.

L'élaboration du projet de construction est relativement bien avancée. En particulier, le dispositif de vide qui constitue à la fois la partie la plus chère et la plus contraignante du point de vue du calendrier de réalisation, a fait l'objet d'études techniques détaillées et d'enquêtes précises auprès des entreprises compétentes. Sur ces bases, un organigramme "Pert" a pu être construit ces dernières semaines, avec la participation de MM.Dupont et Hévin du LAL. De nos discussions avec l'équipe, un accord s'est dégagé sur la très probable nécessité de réévaluer l'ensemble des coûts et des charges par un facteur de  $\approx 50\%$  (ce qui reste bien au-dessous de ce que nous avons craint). Notons enfin que le principe d'une direction par un unique chef de projet a été retenu, mais que le cadre administratif et juridique du projet reste à définir.

Les astrophysiciens et les spécialistes de la relativité générale constituent en France une collectivité très active, vis-à-vis de laquelle le Laboratoire de Physique Théorique de l'Institut Henri Poincaré, sous l'impulsion de son directeur, a joué un rôle mobilisateur pour VIRGO, en accueillant dans le cadre du laboratoire l'équipe du projet, et en promouvant une structure de concertation entre théoriciens et praticiens, le GROG. Une participation directe de théoriciens à l'analyse des données en temps réel sera normalement décidée en temps voulu.

Plus globalement, VIRGO apparaît comme un "projet porteur". Perçu comme un dispositif optique hors classe, il suscite déjà un intérêt actif de la part des meilleures équipes en Optique Quantique et en Lasers. Par ailleurs, les travaux menés par l'équipe sur l'asservissements des lasers YAG et leur pompage par diodes intéressent directement plusieurs industriels européens qui se sont associés à une demande de financement à Bruxelles. Enfin, en ce qui concerne l'innovation technologique qu'implique la réalisation de "super-miroirs" de grandes dimensions, l'industrie française paraît particulièrement bien placée.

Le projet VIRGO en tant que collaboration franco-italienne nous paraît réunir aujourd'hui tous les éléments permettant de prendre des décisions rapides. Par contre le contexte international mérite plus amples réflexions. Le projet américain LIGO, projet unique à deux antennes, est déjà démarré, et sauf incident de parcours toujours possible, il sera normalement financé à partir d'Octobre 1990. Deux antennes au sein d'un même projet confèreront aux chercheurs américains une autonomie pour la mise en évidence de signaux cosmiques par coïncidences. Alors qu'en Europe les compétences sont nombreuses, le risque est grand que faute d'une ambition et d'une concertation suffisantes, nous abandonnions d'entrée de jeu aux USA le leadership. Il est sans doute déjà bien tard pour tenter le regroupement des forces sur un seul projet à deux antennes. Nous souhaitons donc que le projet Fr.-It. (VIRGO) et que le projet RFA-UK soient décidés immédiatement et que, sans plus de délais, une forte structure de concertation européenne soit mise en place.

---





**Recommandations**  
détaillées

**IV.**



---

## Recommandations détaillées

### I. Perspectives

C'est d'emblée dans une large perspective s'ouvrant sur les prochaines décennies qu'il importe de situer le programme VIRGO.

L'astrophysique et la physique des particules ont progressé de concert. Leur interdépendance prend aujourd'hui l'aspect d'une convergence toujours plus grande dont les points de focalisation sont les phénomènes les plus violents : chocs de particules dans les grands collisionneurs, effondrements et collisions stellaires. La détection des ondes de gravitation doit être située dans cette mouvance.

L'évolution de la *physique des particules* - science des forces fondamentales - procède d'une démarche d'unification: l'électricité et le magnétisme au siècle précédent, l'électromagnétisme et la force faible au cours de la dernière décennie, et actuellement l'intégration de l'interaction forte au sein du "modèle standard". Dans le cadre des théories de champ à invariance de jauge, l'unification de la gravitation avec les autres champs de force constitue aujourd'hui un domaine très actif de recherche, bien que presque exclusivement théorique.

L'évolution de *l'astronomie* procède d'une extension systématique des domaines d'observation. Longtemps cantonnée à la lumière visible, elle s'est étendue à l'ensemble du spectre électromagnétique, des ondes hertziennes au rayonnement gamma.

Après la longue quête, par Davis, des neutrinos solaires, et l'observation quasi- accidentelle des neutrinos émis par la supernova 1987-A, le champ d'observation astronomique ouvre actuellement une première fenêtre sur le coeur des étoiles; une dizaine d'"observatoires" de neutrinos cosmiques sont en cours de réalisation. La détection des ondes gravitationnelles permettra une observation plus en profondeur encore.

Dès les années 60 le renouveau de la relativité générale s'est appuyé sur les nouveaux objets de l'astrophysique - quasars, pulsars ... - et, ses contacts avec l'observation se sont multipliés. Les premières tentatives de détection des ondes de gravitation par J. Weber datent de cette époque. Cette quête est restée à ce jour sans résultat, mais l'émergence de la métrologie par interférométrie laser ouvre une voie dont les chances de succès paraissent suffisamment sérieuses pour qu'on ne puisse se placer en dehors du processus engagé.

## II. Le plan international

Afin de définir une stratégie pertinente, il importe de bien circonscrire les enjeux à court et moyen termes. Le premier enjeu, bien entendu, consiste en *la mise en évidence des ondes de gravitation*. Cet enjeu doit être situé au même niveau que celui de la découverte de l'anti-proton en 1958 ou des photons lourds, les  $Z^0$  et  $W^\pm$ . Il s'agit là de découvertes typiquement "nobélisables", validant, par l'observation, des concepts déjà solidement ancrés dans la théorie physique. La politique scientifique d'outre-atlantique se situe résolument dans cette perspective; car le programme LIGO, projet simultané de *deux antennes*, constitue la condition *indispensable* à la validation des signaux par coïncidence.

Pour que l'Europe se place dans cette compétition, comme elle a su le faire dans le domaine des grands accélérateurs, il faut qu'on puisse unir nos forces pour le projet concerté de deux antennes. Bien que les délais soient courts, nous pensons qu'il est encore possible d'aborder cette compétition dans des conditions favorables.

VIRGO doit aussi être pensé dans le cadre de *l'astronomie gravitationnelle*, ouvrant potentiellement un champ de recherche immense. Au-delà de la compétition initiale, cet objectif implique un véritable réseau intégré d'antennes, aussi géographiquement dispersées que possible, afin de pouvoir localiser et commencer à décrire les sources cosmiques. Pour s'engager dans ce domaine, il est indispensable qu'en Europe des équipes s'initient sans délai au maniement des outils adéquats. Si même on voulait ne considérer que cet objectif - au-delà du succès du premier enjeu - on ne pourrait se suffire du simple encouragement à poursuivre les recherches à leur niveau actuel. On ne pourrait ni différer les décisions relatives à une politique européenne, ni même en modifier notablement l'échelle.

Aussi la question essentielle que s'est posé le comité d'évaluation, c'est de savoir s'il est envisageable de se limiter à *une seule antenne européenne*, supposant qu'elle puisse accueillir un nombre suffisant d'équipes des divers pays, et leur donner occasion d'y affiner leurs méthodes. Sans aller jusqu'à récuser strictement cette alternative, une telle perspective est apparue au comité comme un pis-aller, peu propice à stimuler les ambitions de succès de la part de chercheurs qui seraient ainsi cantonnés au rôle de faire-valoir vis-à-vis de leurs collègues américains.

.....

### III. Questions de stratégie

L'association du groupe d'Orsay et du groupe de Pise (INFN) nous paraît constituer une très bonne base de collaboration, déjà fortement soudée par 4 années de travaux en commun. Suite à un travail original, les résultats obtenus à Pise concernant les suspensions antisismiques confèreront au VIRGO une sensibilité optimale pour les basses fréquences ( $\approx 10$  Hz). Le laboratoire INFN-Pise de physique des particules, dont dépend le groupe, apporte en outre l'expertise sur la gestion de grands projets. Sans préjuger des accords éventuels avec d'autres groupes, en particulier européens, il nous paraît que *la collaboration Orsay-Pise doit constituer la base de notre participation à un programme international.*

En conséquence, nous recommandons que, préalablement à un engagement définitif, le CNRS propose à l'INFN la mise en place d'un *comité franco-italien pour VIRGO* \* qui ait pour tâche d'examiner immédiatement tous les aspects scientifiques, techniques et organisationnels, en vue de la réalisation en commun du projet d'antenne.

Nous recommandons qu'en parallèle, *de manière très rapide, le CNRS mette en place des financements* pour accélérer les tests en cours et pour faire progresser la préparation d'un "projet conceptuel détaillé". En concertation avec l'équipe du projet, nous avons évalué à  $\approx 4$  MFrS le montant souhaitable (voir note sur les coûts pour préétudes), en escomptant qu'un effort semblable soit réalisé par l'INFN.

Avant la décision définitive, et dès que possible, il faut engager une discussion avec l'ensemble des instances concernées au plan international. Déjà sont en place, aux Etats-Unis une direction unique pour le projet à 2 antennes piloté par la NSF et, en Europe, un comité RFA-UK (BMFT-SERC) pour le projet d'une antenne. Le comité franco-italien pour VIRGO devra en particulier avoir pour tâche d'examiner, de concert avec le comité BMFT-SERC, la participation européenne à la collaboration internationale dans ce domaine. *Une émanation des deux comités européens devra logiquement constituer l'interlocuteur qui manque actuellement face aux Etats-Unis dans les discussions menées à l'initiative de la NSF.*

---

\* Nous avons été informé que, suite à notre suggestion, la direction du CNRS vient de proposer à la direction de l'INFN la mise en place d'un comité franco-italien de six membres, avec la participation du côté français de P.Couturier et J.Haïssinski (directeurs-adjoints de l'INSU et de l'IN2P3) et de P.Fleury.

#### IV. Le groupe d'Orsay

Le groupe d'Orsay apporte au projet VIRGO la caution scientifique principale. Les travaux et publications réalisés depuis une dizaine d'années en métrologie laser - dans la perspective précise de la détection des ondes de gravitation - *font autorité au plan international*. Les principaux éléments d'une antenne ont été testés et les simulations numériques pour le faisceau étendu à plusieurs kilomètres sont les seules de ce type réalisées à ce jour.

Le groupe devra *faire face à des tâches plus lourdes* et plus diverses que jusqu'à présent; tout d'abord le suivi de la réalisation de VIRGO, puis le maintien d'une intense activité de recherche-développement nécessaire aux étapes de développement du VIRGO. En outre, le groupe devra entretenir des contacts plus intenses avec les interlocuteurs extérieurs; vers les partenaires des autres projets et aussi vers la collectivité des physiciens et des astrophysiciens en vue de l'exploitation commune des résultats.

Ces multiples charges exigent un rapide accroissement du groupe, d'une part par satellisation d'autres groupes possédant des compétences complémentaires, mais aussi et surtout par la consolidation de l'équipe d'optique. Il est indispensable de *viser au moins le doublement de l'équipe de base*. Ce processus peut sans doute être en partie réalisé par des reconversions de chercheurs (occasionnant pour le noyau initial un lourd travail pédagogique).

Notons que le financement de ce groupe devra être assuré, indépendamment du financement du projet VIRGO; il s'agira donc d'un budget en reconduction du budget actuel réactualisé à proportion de l'accroissement de l'effectif.

D'ores et déjà, *certain théoriciens de la relativité et astrophysiciens français* se sont formellement associés au projet VIRGO et participent à des discussions dans le cadre du "GROG" (groupe pour la recherche sur les ondes gravitationnelles). Il nous paraît indispensable que certains de ces chercheurs soient impliqués très concrètement dans la mise en place du projet et participent en particulier aux dispositifs d'analyse en temps réel; ceci conditionnera *une exploitation rapide des données, à laquelle il importe que l'équipe du projet puisse être directement associée*.

De manière plus générale, le problème de la propriété scientifique des données (*qui signera?*) devra faire l'objet d'une réflexion sérieuse et de discussions approfondies en ce qui concerne les résultats qui devraient être publiés conjointement avec les équipes oeuvrant sur les autres antennes.

## V. Les structures du projet

Pour ce qui concerne *l'organisation administrative et technique* du projet, une élaboration sérieuse reste à faire qui sera normalement du ressort du comité CNRS-INFN, en association avec le groupe du projet. Le comité d'évaluation préconise qu'un seul "chef de projet" soit responsable devant la direction scientifique, et dispose, en cas de désaccord, d'un recours direct auprès des instances de tutelle.

L'examen attentif du projet aux plans financier, technique et de personnels (annexe X) n'a pas fait apparaître d'erreur manifeste d'évaluation. Il nous a paru néanmoins que les chiffres étaient trop souvent tirés vers le bas; *une réévaluation d'ensemble, par un facteur d'environ 50%*, nous paraît nécessaire (nous noterons que les locaux prévus seraient beaucoup trop exigus si l'antenne n'était construite à proximité d'un grand laboratoire). Au total, nous pensons qu'une évaluation prudente se monte à 325 MFr HT (valeur 1990) dont 75 MFr de personnel dédié au projet (fonctions d'ingénieurs et de techniciens) et 250 MFr de construction, y compris 10% d'aléas.

L'équipe du projet devra élaborer *une phase de démarrage*, à un niveau peut-être moins ambitieux que ce qui est décrit dans le rapport VIRGO (rapport vert), car il est essentiel que les essais d'optique puissent commencer dès la mise à disposition de l'enceinte à vide. Ceci peut entraîner quelques (faibles) surcoûts, par exemple pour l'achat de miroirs rapidement disponibles.

*Les conditions de maintenance* et les charges de fonctionnement devront être réexaminées dès que seront précisés le cadre et le site de la réalisation.

## VI. Ouvrir largement le débat

Il n'est pas vraiment surprenant qu'un sujet de recherche à la frontière de plusieurs domaines, physique des particules, astrophysique, optique, soit en réalité si mal connu de l'ensemble des chercheurs. Mais cela ne facilite pas la prise en compte du projet.

Aussi bien afin d'éviter les malentendus que de susciter les contributions actives, le débat sur tous les points évoqués doit être ouvert aussi largement que possible à l'ensemble de la collectivité scientifique, et principalement au CNRS et au CEA. Il est tout à fait souhaitable que se poursuive activement le débat qui s'est instauré depuis quelques mois - séminaires, Rencontres de Moriond (Fév.1990), Conseil Scientifique de l'IN2P3 (Mars 1990) etc... - .





## V.

### Documents établis au cours de la mission d'évaluation:

#### A. Documents d'ensemble

	Page
1. Evaluation VIRGO: Note n° 1.	36
2. Evaluation VIRGO: Note n° 2.	37
3. Evaluation des coûts pour préétudes	41
4. Rapport au Conseil Scientifique IN2P3	42

#### B. Visites à l'étranger

1. Visite à Pise (13 Janvier)	51
2. Visite UK (2 Février)	57
3. Visite USA (12, 13 et 14 Février)	61
4. Visite à Garching (15 Mars)	67

#### C. Etudes par thèmes

1. Physique et astrophysique	71
2. Relativité générale	75
3. Sensibilité de VIRGO	77
4. A propos du rapport sur la sensibilité de VIRGO	81
5. Rapport du groupe de travail F.Dupont	83

Pièce jointe:

Organigramme "Pert" pour la réalisation de l'antenne VIRGO	97
------------------------------------------------------------	----



## Documents d'ensemble

	Désignation	Date	pages
1.	Evaluation VIRGO: Note n° 1.	29 Nov.	1 p.
2.	Evaluation VIRGO: Note n° 2.	20 Janv.	4 p.
3.	Evaluation des coûts pour préétudes	30 Mars	1 p.
4.	Rapport au Conseil Scientifique IN2P3	10 Fév.	8 p.



**NOTE N°1**  
**concernant l'évaluation interne par le CNRS**  
**du projet VIRGO**

---

Le groupe d'évaluation mis en place par la direction du CNRS s'est réuni une première fois le 20 novembre 1989.

Il prend acte de l'intérêt très fondamental que représenterait l'observation des ondes gravitationnelles au double point de vue des théories de la gravitation et l'astrophysique.

Il prend acte des potentialités nouvelles que pourraient apporter en ce domaine les développements récents en interférométrie laser.

Il prend acte enfin de la dynamique internationale en ce domaine et en particulier de la volonté exprimée par l'INFN (Italie) de promouvoir une collaboration avec les équipes françaises.

Le groupe s'efforcera d'apporter dans un délai de quelques mois une évaluation réalisée sur l'adéquation des moyens aux enjeux, en particulier sur les plans technique et organisationnel.

Pour le Président du Groupe d'évaluation  
Patrick FLEURY,



Pierre COUTURIER.

Comité d'Evaluation VIRGO

Paris le 9-2-1990

**NOTE N°2**  
**concernant l'évaluation interne par le CNRS**  
**du projet VIRGO**

---

A l'issue de sa première réunion, le 20 Nov. 1989, le comité d'évaluation a émis une première note sur VIRGO dont la copie est jointe.

Lors de la seconde réunion, le 18 Déc. 1989, le comité a entendu un rapport de trois de ses membres (B.C., J.L., & R.S.) concernant les hypothèses d'astrophysique sur lesquelles se fondent le projet. Bien que les incertitudes restent grandes, les évaluations données par le rapport VIRGO ont paru conformes à l'état des connaissances sur les phénomènes gravitationnels violents. Il a été souligné que les observations sur la Supernova 1987-a ont permis de valider les scénarios concernant les effondrements d'étoiles dont dépendent largement les prévisions; en particulier, l'existence probable de plusieurs fragments \* indique une explosion anisotrope propice à l'émission d'ondes gravitationnelles.

Par ailleurs, un examen très détaillé des coûts, délais et charges de travail, entrepris lors de cette même réunion sous l'égide d'un membre du comité (Fr.D.), a été ensuite poursuivi par plusieurs séances de travail avec les membres de l'équipe de A.Brillet, puis à l'occasion d'une réunion tenue à Pise avec l'ensemble du groupe VIRGO le 13 Janv.1990. Sur ce point, les évaluations données par le Rapport VIRGO, sont apparues parfois sous-estimées, mais les désaccords, volontiers pris en compte par le groupe, ne modifient pas l'ordre de grandeur du projet (notre estimation provisoire est de 260 MF. HT incluant les aléas, et hors salaires). L'état des études de détails sur les principaux postes de dépenses est apparu plus avancé que nous le présumions.

Les difficultés techniques qu'implique l'objectif d'une sensibilité 100 à 1000 fois supérieure à celle de la génération actuelle de détecteurs (cylindres de Weber et premières antennes à interférométrie laser de 10 à 30m de longueur) ont été discutées. Les points les plus délicats seront sans doute le contrôle du bruit thermique et l'obtention de miroirs de qualité suffisante. Sur le

---

\* Depuis l'écriture de la présente note, les auteurs de cette observation - d'un pulsar au centre de 1987-A - on fait état d'une très probable erreur instrumentale.

premier point, un complément d'étude est sans doute souhaitable, mais il reste probable que cette question ne pourra pas être clairement évaluée avant qu'on ne dispose d'une antenne vraie grandeur; la prise en compte un dispositif cryogénique, obérant les coûts mais aussi gênant la nécessaire versatilité d'un premier dispositif, est clairement prématurée. Le second point, concernant la réalisation des grands miroirs, constitue un risque au niveau industriel; néanmoins, l'industrie française paraît être bien placée en ce domaine, ce qui facilitera une concertation, bénéfique éventuellement aux deux parties. Cette fabrication étant sur le chemin critique du planning, il serait prudent de s'assurer que les premiers tests de l'antenne puissent être entrepris avec des miroirs de moindre performance et donc disponibles à plus court terme (d'où un surcoût à chiffrer). Notons enfin que la réalisation du laser ne devrait pas comporter d'aléas notables, en bonne partie du fait de la bonne concertation de l'équipe de A.Brillet avec l'industrie française.

La réunion à Pise, à laquelle ont participé quatre membres du comité (P.C., F.D., P.F. et R.K.) et l'ensemble du groupe VIRGO, s'est tenue en présence de Paolo Srolin président du comité des expériences hors accélérateur de l'INFN, et de Rino Castaldi, directeur du laboratoire (INFN section Pise). Nous avons pu constater la très forte prise en compte du projet VIRGO du côté Italien. Les compétences sont complémentaires de celles du groupe d'Orsay dont la contribution est impérativement escomptée. Le groupe italien, dirigé par A. Giazotto, a focalisé son activité sur la réalisation des suspensions anti-sismiques dont les performances sont sans conteste supérieures à celles élaborées pour les projets d'antennes similaires. Le groupe a aussi abordé l'étude des dispositifs de contrôle et de mise-en-ligne. Il a enfin contribué avec le groupe français à l'étude du vide et des infrastructures. Les Italiens, de Pise et de Naples, sont pour le moment plus nombreux que la partie du groupe français concernée par la construction; il comporte plusieurs physiciens déjà familiarisés avec les grands équipements par leur participation aux détecteurs du LEP au CERN. La direction de l'INFN a déjà inscrit le projet VIRGO dans le cadre de son programme pluri-annuel. Un site est proposé à quelques kilomètres de Pise, dont les caractéristiques sismiques paraissent adéquates mais l'éventuelle obsolescence de l'accord préalable des autorités régionales, au cas où l'achat du terrain ne serait pas décidé à bref délai, inquiète vivement A.Giazotto, car les contraintes de caractère écologique rendent très aléatoire la disponibilité d'autres sites dans le Nord de l'Italie. Il serait bon de ce point de vue qu'une décision rapide soit prise (il serait intéressant aussi de prévoir la possibilité d'installer ultérieurement un bras transversal réunissant les extrémités de la configuration en L proposée, pour permettre des expériences de gyrométrie).

Le comité a abordé l'examen du contexte international concernant les projets d'antennes par interférométrie laser. Une première visite est prévue en Angleterre; le président du comité (P.F.) rencontrera le 2 Fév. MM.Corbett et Hough. Il sera accompagné de Ph.Tourrenc; J.Bordé, représentant du CNRS à Londres, participera à cette discussion. Nous nous informerons de la situation du projet de collaboration avec l'équipe du Max-Planck de Garsching (RFA) pour la

réalisation d'une antenne semblable à VIRGO. Une visite du président du comité (P.F.) est prévue pour les 12,13 et 14 Fév. aux USA: au MIT, au CALTECH et. aussi auprès MM.Bardon et Isaacson de la NSF, à Washington; il sera accompagné de A.Brillet. Nous espérons mieux connaître l'état du projet LIGO qui doit comporter deux antennes, l'une sur la côte Ouest et l'autre sur la côte Est. Si une concertion USA-Europe paraît être souhaitée par la NSF, il nous faut néanmoins être attentif au fait que la maîtrise de deux antennes sous la seule juridiction américaine, et d'ailleurs dans le cadre d'un projet unifié, confèrera à nos collègues d'outre Atlantique un haut niveau d'autonomie dans la mise-en-évidence de coïncidences (ce qui conditionne toute crédibilité dans l'observation d'une onde cosmique). A contrario, il n'y a pas en Europe d'accord global assurant ne serait-ce qu'une décision simultanée et des calendriers concertés.

Ce problème délicat concernant le nombre d'antennes souhaitables au plan international ou européen a fait l'objet d'un premier débat au sein du comité. Les arguments de type astrophysique pour un nombre élevé d'antennes, qui conditionne une bonne localisation des sources, sont sans doute prématurés s'agissant d'un projet de "première génération"; il en est de même pour les arguments de physique relativiste portant sur la possible détermination de la polarisation des ondes (ou valeur du spin du graviton). Les antennes de ce nouveau type - par interférométrie laser sur de longues distances - auront d'abord à démontrer leur capacité à détecter des ondes de gravitation; or il faut pour cela au moins deux antennes, d'où l'exigence d'un effort concerté. Certes la coïncidence à trois antennes, ou plus, augmenterait la crédibilité d'une observation ou, corrélativement, améliorerait la sensibilité globale. En outre, plus il y a d'antennes, plus il y a de chances qu'au moins deux d'entre elles soient en fonctionnement au moment où se produirait un évènement cosmique majeur (ex.Super Nova 1987-a).

Le problème du nombre d'antennes, qui recouvre en fait l'alternative pour ou contre la participation française à VIRGO, nous paraît mieux se situer dans un autre débat. Sans présumer nécessairement de la réponse, la question est: importe-t-il que la recherche française (et la recherche européenne), soit présente dans ce secteur? Dans cette problématique, il faut d'abord se demander si, après les efforts restés vains à ce jour pour détecter les ondes gravitationnelles par la méthode développée par Weber, l'approche nouvelle comporte de sérieuses chances d'aboutir. Un tel succès viendrait couronner un long travail déjà accumulé mais sans doute bien loin encore de son but. C'est tout un savoir-faire qu'il faudra continuer d'acquérir, et des équipes pluri-disciplinaires qu'il faudra consolider.

On en est, à ce jour, bien loin des investissements en chercheurs et en finances de ce qu'il a fallu pour observer, au CERN, le photon lourd (le  $Z^0$ ); or l'enjeu scientifique est d'importance comparable au seul plan de la physique, et s'y ajoute l'intérêt astrophysique sans doute plus considérable encore. Mais même dans cette perspective d'un enjeu majeur, entraînant à terme des



investissements importants, la prudence pourrait consister à laisser à d'autres les premiers risques pour ne s'engager qu'à coup sûr. Tout risque se paie. Mais trop de prudence aussi. Au vue de la relative modicité des efforts nécessaires dans la phase actuelle (aussi bien vis-à-vis des enjeux que vis-à-vis de l'ampleur que prendraient les phases ultérieures), il paraît raisonnable de s'engager sans attendre, tirant avantage de l'avance dont dispose aujourd'hui l'équipe de A.Brillet concernant la partie la plus innovante d'un tel projet et de la dynamique engagée avec l'INFN. Il faut remarquer que s'il est difficile de prévoir aujourd'hui ce que pourraient être les antennes gravitationnelles de la génération suivant le présent projet, il est permis de penser qu'elles en reprendront beaucoup d'aspects et que le savoir-faire acquis sera de la plus grande importance pour leur conception et leur construction.

Si ce point de vue devait être retenu, il faudrait alors être attentif à ce que le projet ne soit pas stérilisé par une insuffisante concertation avec au moins un autre projet d'antenne, et aussi à ce que, au plan de la recherche française, cet effort ne soit pas sans lendemain.

Sur le premier point, les meilleures garanties pourraient provenir d'une concertation suffisamment forte (et donc contraignante) avec le projet anglo-allemand, visant à assurer en Europe un ensemble auto-suffisant, comparable à l'ensemble des deux antennes du projet américain, avec lequel les accords déjà esquissés pourraient alors se développer sur une base plus symétrique et donc plus équilibrée.

Le second point, concernant la pérennité d'une activité française dans ce domaine, comporte lui-même deux volets: la compétence instrumentale et le suivi des travaux au plan théorique. En ce qui concerne la compétence instrumentale, l'équipe de A.Brillet peut et doit constituer le noyau initial, mais il lui faudra trouver sans délai une base plus large, par recrutement ou par osmose avec d'autres groupes, ainsi qu'un cadre institutionnel mieux adapté à l'ampleur des tâches futures. Au second titre, il y a quelques solides garanties du côté des astrophysiciens et de quelques physiciens théoriciens, très intéressés par l'évolution de ce projet, au point pour certains d'entre eux (dont principalement Ph.Tourrenc) d'avoir apporté un soutien déterminant dans la phase de gestation; il importerait néanmoins de consolider, autour d'une entité déjà en place, le GROG, une liaison structurelle aussi forte que possible avec l'équipe franco-italienne chargée de la construction.

En tout état de cause, il serait important que d'autres physiciens et astrophysiciens s'engagent derrière ce projet, tant en France qu'en Italie.

Patrick Fleury,  
président du groupe d'évaluation.

## Evaluation des coûts pour préétudes

Pour préserver les chances de faire face à la compétition qui s'engage au plan international, et donc pour palier autant qu'il est possible au retard de décisions concernant VIRGO, il est nécessaire que l'équipe de projet puisse réaliser par avance toutes pré-études directement liées au projet.

Nous avons donc examiné cette question avec les membres de l'équipe et faisons conjointement les recommandations suivantes:

<b>1. Participation aux études sur les suspensions</b>			
(Resp. C.N.Man)	Matériel d'optique	100	KFrs
	Missions à Pise	100	KFrs
<b>2. Travaux sur la simulation du faisceau principal</b>			
(Resp. J.Y.Vinet)	Macintosh 2	60	KFrs
	Frais de calcul	100	KFrs
<b>3. Métrologie optique</b>			
(Resp.A.Brillet & C.N.Man)	Participation à un laser YAG *	250	KFrs
	Micro-mécanique	300	KFrs
	Réalisation d'un interféromètre (d'un type voisin de celui du VLT)	1000	KFrs
	Divers	50	KFrs
	<b>Total</b>	<b>1960</b>	<b>Kfrs</b>

Ces sommes ne tiennent pas compte de ce que l'équipe de Pise doit de son côté investir pour faire face aux mêmes types d'urgence sur les problèmes de leur ressort.

Par ailleurs, il sera donc de bonne politique d'engager, en concertation avec la partie italienne, des investissements permettant de réduire les délais. Selon l'organigramme "Pert" (joint au rapport), les chemins critiques pour l'aboutissement du projet concernent la réalisation des grands super-miroirs (qui relèvent de la partie française) et le tube à vide. Une somme de  $\approx 2000$  KFrs devrait être engagée rapidement sur ces postes, pour des contrats d'études auprès de l'industrie.

C'est donc un total de  $\approx 4$  MFrs - soit  $\approx 2-3\%$  de l'éventuelle contribution française - que nous suggérons d'engager sans délai.

La mise en place de ces financements devra se faire en même temps que l'équipe française du projet commence à se renforcer, en s'associant éventuellement à d'autres équipes.

---

\* 150 KFrs sont déjà assurés par l'INSU, sur un coût global inférieur à 500 KFrs (à négocier avec le fabricant).

**Note pour le Conseil Scientifique de l'IN2P3****(réunion du 2 Mars 1990)**

sur

**VIRGO**—  
**P.Fleury, LPNHE Ecole Polytechnique****Résumé**

La mise en évidence directe des ondes gravitationnelles est un enjeu poursuivi depuis près de 30 ans, par l'observation des déformations qu'elles devraient induire sur des masses suspendues: les barres de Weber. On recherche des ondes d'origine cosmique - explosion de supernovae ou coalescence d'étoiles binaires - car aucun dispositif n'a pu être imaginé à ce jour qui permette de générer des ondes d'amplitudes suffisantes. Les très hautes performances obtenues en métrologie par interférométrie laser ont stimulé depuis près de quinze ans les travaux de plusieurs équipes pour un nouveau type de détecteur basé sur le schéma de l'expérience de Michelson. Trois projets au moins sont envisagés, dont VIRGO, d'interféromètres comportant deux bras orthogonaux de 3 à 4 km. Les sensibilités escomptées sont de l'ordre de  $10^{-21}$  à  $10^{-23}$  ( $\text{Hz}^{-1/2}$ ), soit une amélioration par un facteur de  $10^3$  à  $10^5$  par rapport aux meilleures barres de Weber. A ces niveaux de sensibilité, les modèles astrophysiques, que la récente supernova a permis de valider, laissent espérer des événements fréquents. Ainsi pourrait s'ouvrir une nouvelle astronomie, permettant d'accéder aux phénomènes les plus violents, donc les plus passionnants pour la physique fondamentale.

**Introduction**

Bien que la gravitation ait jalonné l'histoire de la science, et que la Relativité Générale remonte à 1915, ce secteur de la physique fondamentale est actuellement très extérieur au processus expérimental. L'archétype de l'expérience de Herz, associant émission et détection, paraît hors de portée pour le champ gravitationnel. On ne sait pas réaliser d'émetteurs suffisamment puissants (même si certains calculs très optimistes ont pu laisser espérer que les grands accélérateurs puissent être de tels émetteurs) ou des détecteurs suffisamment sensibles. Quant à la détection de sources cosmiques, les meilleurs détecteurs actuels - les barres de Weber cryogéniques - ont des sensibilités encore insuffisantes (la supernova "1987-a" aurait peut-être été observée si plusieurs barres avaient pu être alors en fonction). Des diverses méthodes qui laissent espérer un gain notable de sensibilité, celle reposant sur le principe de l'interféromètre de Michelson est la seule qui, à ma connaissance, ait fait l'objet depuis déjà une quinzaine d'années d'études très systématiques. Des prototypes, avec des bras de quelques dizaines de mètres, ont été construits à Caltech, au MIT, à Glasgow et à Munich. Les performances sont déjà comparables à celles des barres, et l'extension à des longueurs de 3 à 4 km constitue la condition nécessaire - si ce n'est suffisante - pour gagner les facteurs supplémentaires. Aux USA, la décision paraît très probable pour la construction, à partir de

1991, de deux antennes identiques; c'est le projet LIGO. Un accord entre l'Angleterre et l'Allemagne pour la réalisation d'une antenne devrait être conclu avant Juillet 1990 (ce projet n'a pas encore reçu de patronyme). Enfin le projet franco-italien, VIRGO, fait actuellement l'objet d'une évaluation par le CNRS; du coté italien, l'INFN en a déjà retenu le principe sous réserve d'un accord de coopération avec la France. La question est de savoir si dans ses grandes lignes ce type de projet est jouable, mais surtout si nous devons le jouer maintenant, en concertation et en synchronisme avec la collectivité internationale. Dans cette note, le projet proprement dit sera décrit, puis situé dans son contexte physique et astrophysique; enfin, j'évoquerai les éléments de décision actuellement analysés par le groupe d'évaluation.

## I Le Projet VIRGO

Comme pour l'expérience de Michelson, un faisceau lumineux est envoyé sur un miroir séparateur donc semi-transparent ( $t/r = \text{transmis} / \text{réfléchi} = 1$ ) incliné à  $45^\circ$  sur l'axe. Une partie de la lumière progresse donc selon la direction initiale tandis que l'autre partie est réfléchie dans une direction perpendiculaire. A 3 km de là, à l'extrémité de chacun des bras, un miroir renvoie les photons vers le miroir séparateur. On fait alors interférer les deux faisceaux. On se cale sur une frange sombre, et on attend l'onde gravitationnelle! Selon l'orientation de propagation et de polarisation de l'onde, l'un des bras doit s'allonger tandis que l'autre diminue, puis inversement lorsque la phase de l'onde gravitationnelle aura elle-même changé.

D'entrée de jeu ce dispositif présente un avantage tangible par rapport aux barres de Weber, objets solides qui du fait de leurs modes propres de résonance amplifient le signal gravitationnel pour une bande étroite en fréquence. Le dispositif de Michelson dispose au contraire d'une bande passante très large.

Au schéma de base, viennent s'ajouter divers dispositifs d'amplification:

a) Pour accroître les déphasages et donc la sensibilité, on augmente artificiellement les distances. Au lieu d'un seul aller et retour, les photons parcourent plusieurs dizaines de fois les 6 km du double trajet,

- soit qu'on guide chacun des faisceaux par le jeu de deux miroirs - le miroir de renvoi et, près du séparateur, un miroir muni d'un orifice d'entrée - disposés en sorte qu'après un nombre donné d'allers et retours, les photons retrouvent l'orifice et s'échappent; c'est le système dit de ligne à retard.

- soit que le faisceau soit retenu entre les deux extrémités d'un Fabry-Perot - le miroir ajouté est alors semi-transparent ( $t/r \approx 10\%$ ) - l'augmentation de parcours devant être alors considérée en valeur moyenne. C'est la solution choisie par VIRGO et aussi par le projet américain LIGO.

b) Pour diminuer l'erreur statistique au niveau de la mesure de la frange d'interférence, on augmente artificiellement la puissance du laser par un facteur de l'ordre de 50 en recyclant le

faisceau ("après usage"). Notons que la méthode, proposée par Drever, a été testée d'abord par l'équipe d'Alain Brillet. Puisqu'on se cale sur une frange noire de l'interférence, la puissance en voie de sortie est minimale; les photons sont donc pour la plupart envoyés sur l'autre voie, en direction du laser. On les intercepte alors par un miroir supplémentaire placé en aval du laser qui les recycle vers le miroir séparateur.

La partie optique du dispositif comporte en outre des asservissements, en phase et en puissance, dont certains font d'ailleurs l'objet de transferts de technologie auprès de l'industrie européenne (BMI en Fr. et MBB en RFA). Notre conviction au sein du groupe d'évaluation est que sur ces points délicats l'équipe de A.Brillet est particulièrement compétente. De même en ce qui concerne le laser, anticipant le choix des autres groupes pour un YAG, au lieu du laser à Argon d'abord envisagé, l'équipe a acquis une solide expérience; sans même hypothéquer sur les améliorations prévisibles à relativement court terme, leur laser prototype est déjà susceptible d'assurer le démarrage du projet.

Certains aléas concernant l'optique sont liés aux grandes dimensions du futur détecteur. Néanmoins le faisceau fait l'objet d'une simulation numérique très détaillée prenant en compte les molécules résiduelles du vide de l'enceinte, les défauts des miroirs, les incertitudes au niveau de l'injection, etc... . Un des points critiques concerne les miroirs qui ne doivent ni diffuser - sous peine de réinteractions parasites avec le faisceau - ni absorber car un échauffement local entraînerait une déformation des surfaces. Ces diverses pertes - au niveau de  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  - paraissent sous contrôle pour les substrats (en silice), mais en ce qui concerne les revêtements réfléchissants ce n'est pas acquis pour de grandes surfaces. Pour des miroirs de petites dimensions (utilisés pour les gyrolasers) de tels revêtements existent, réalisés par dépôts de diélectriques alternés en couches minces. L'industrie française paraît bien placée en ce domaine, mais elle n'est pas actuellement équipée pour les dimensions nécessaires au projet. Des solutions provisoires pourraient être envisagées afin d'éviter un retard des tests de l'antenne.

Les miroirs doivent être très stables; ils doivent être isolés des bruits sismiques dans un rapport de  $10^{-9}$ . Deux prototypes de suspension anti-sismique ont été réalisés (en vraie grandeur) par le groupe de A.Giazotto à Pise. Par rapport aux autres projets d'antenne, la solution retenue présente cet avantage qu'elle prend en compte non pas seulement les mouvements horizontaux, les plus critiques, mais aussi les mouvements verticaux qui peuvent être nuisibles par effet de couplage entre les divers modes de vibration. Les performances obtenues sont de nature à conférer à VIRGO une bonne sensibilité jusqu'aux très basses fréquences de quelque 10 Hz.

Cette analyse du projet ne nous permet certes pas de conclure à l'assurance d'un succès. Qui pourrait affirmer qu'un gain de sensibilité par 3 ordres de grandeur peut être réalisé à coup sûr? Par comparaison avec les autres groupes, la collaboration VIRGO a de solides atouts. Un choix raisonné a amené le groupe à consolider ses compétences, peut-être plus que tout autre, en ce qui concerne tous les points clés du projet. Le prix concédé a été de ne pas réaliser d'antenne prototype. La volonté souvent réaffirmée d'une bonne concertation internationale, sous-tendue par la nécessité d'observer des coïncidences entre antennes et concrétisée par la mise en place de groupes de travail, permet d'escompter que les points faibles des uns seront compensés par les points forts des autres, avec réciprocité.

## II Le Contexte Physique et Astrophysique

Du point de vue de la physique fondamentale, il n'est guère besoin d'insister sur l'intérêt considérable que représenterait la mise en évidence des ondes de gravitation; il suffit d'évoquer la découverte des photons lourds - les  $Z^0$  et  $W^\pm$  -. La relativité générale a certes été déjà l'objet de tests cruciaux. D'autres théories, ou classes de théories, peuvent sans doute s'accommoder des observations, mais un large consensus s'est établi sur la base de la théorie d'Einstein, à l'instar de la théorie électro-faible de Weinberg Salam avant même la découverte des Z et W. La preuve expérimentale que la gravitation relève d'une théorie des champs apporterait un sérieux encouragement au projet d'unification de l'ensemble des forces. Néanmoins, au niveau d'une première génération d'antennes interférométriques, il ne faut pas escompter qu'on puisse déjà qualifier le champ gravitationnel en analysant, par exemple, la polarisation des ondes. Notons que la quantification du champ ne peut pas être mise en évidence par cette classe d'expérience, mais, à terme, le spin 2 de l'éventuel graviton pourrait être établi.

Une preuve, indirecte, de l'existence du champ de gravitation vient d'être apportée par l'étude du pulsar binaire "1913+16". On doit à J.Dyson d'avoir le premier supposé l'existence de systèmes binaires en voie de coalescence, attirant l'attention sur l'extraordinaire source d'informations que peut apporter leur observation. La perte d'énergie mise en évidence par l'augmentation de la fréquence de rotation du système "1913+16" est hors de proportion avec les effets de gravitation Newtonienne, les effets de marée. Les progrès récemment réalisés par Damour et Deruelle en approximation de calcul relativiste ont permis d'atteindre la précision requise pour modéliser l'évolution de ce système (paramétrisé de manière suffisante par les seules masses des deux objets et leur distance); la confrontation avec les données permet de valider l'hypothèse que la perte d'énergie est due pour l'essentiel à l'émission d'ondes de gravitation.

L'amplitude des ondes gravitationnelles émises par "1913+16" peut être évaluée de façon réaliste; elle se situe au-dessous des sensibilités escomptées pour des dispositifs de la classe de

VIRGO. Par contre, la phase finale, celle de la coalescence, doit s'accompagner d'émissions considérablement plus violentes, générant un signal de courte durée, mais de structure bien définie en fréquence, ce qui est tout particulièrement favorable à une détection par une antenne interférométrique. Les meilleurs espoirs d'observation directe d'ondes de gravitation se fondent sur ce type de phénomènes. Pour un seuil de sensibilité de  $\approx 10^{-21}$ , plusieurs événements audibles par an sont escomptés sur la base du nombre - élevé - de systèmes doubles, et du taux d'effondrements vers une étoile à neutrons ou un trou noir. Précisons qu'au stade des premières antennes, l'enjeu n'est pas la coalescence pour elle-même, mais une première mise en évidence des ondes de gravitation.

L'explosion de supernovae constitue une autre classe d'événements susceptibles d'être observés par une antenne du type VIRGO. La supernova "1987-a" a été l'occasion de valider, au moins au plan qualitatif, le scénario préalablement postulé pour ce type d'événement. En outre, l'observation transitoire, au centre de "1987-a", d'un pulsar très rapide \*, à la limite de stabilité, aurait sans doute évolué vers une cassure, indique que de fortes anisotropies de masse ont pu être mises en jeu, ce qui conditionne l'émission d'ondes gravitationnelles de grande amplitude. De par sa proximité, la supernova 1987-a aurait peut-être été détectée par les actuelles barres de Weber si plusieurs d'entre elles avaient été en fonctionnement. Pour un champ d'investigation étendu en proportion des gains de sensibilité escomptés, le taux de supernovae audibles pourrait être de même ordre que pour la coalescence des binaires, mais l'observation en sera plus difficile par l'absence de structure en fréquence. La seule preuve tangible d'un tel signal ne pourra résulter que d'une coïncidence entre plusieurs antennes.

Une émission de neutrinos a été observée au moment de l'explosion de "1987a". Stimulé aussi par les premiers résultats positifs obtenus sur les neutrinos solaires, un vaste programme d'observation se met en place, avec actuellement une dizaine de projets dont près de la moitié sont financés et quelques-uns sont en cours d'installation. Initialisé par les travaux de Davis, de même que ceux sur les ondes gravitationnelles l'ont été par Weber, on assiste aujourd'hui aux débuts d'une astronomie des neutrinos à laquelle viendra certainement s'adjoindre une astronomie des ondes gravitationnelles. Ces deux domaines ouvrent en partie sur une même fenêtre: l'observation directe des phénomènes les plus violents au coeur des étoiles et des quasars. Les ondes de gravitation devraient en outre constituer des sondes privilégiées sur ces singularités de l'espace-temps que constitueraient, à l'instar du Big-Bang, les encore hypothétiques trous noirs. C'est à cette frontière de l'astrophysique que la physique fondamentale a les meilleures chances d'être stimulée et éventuellement mise en question.

---

\* Depuis l'écriture de la présente note, les auteurs de cette observation - d'un pulsar au centre de 1987-a - ont fait état d'une très probable erreur instrumentale.

### III Eléments d'une décision

Il n'y a pratiquement pas de participation française aux études expérimentales sur la gravitation. Aucun des organismes ayant compétence à la construction d'équipements lourds (CEA, INSU, IN2P3) n'est directement impliqué dans quelque projet que ce soit. Au moment où les recherches sur la "5<sup>ème</sup> force" paraissent déboucher sur une impasse, doit-on se féliciter de cette réserve? Un projet de barres de Weber avait été entrepris à l'Observatoire de Paris-Meudon; le dispositif (aujourd'hui exposé à La Villette) fut abandonné lorsque l'investissement d'une cryogénie parut inévitable. Force est de constater que, même au prix d'une cryogénie au niveau du millikelvin, les groupes plus accrocheurs n'ont encore aucun résultat.

Le groupe d'Alain Brillet, à l'incitation de Ch.Bordé et soutenu par certains théoriciens de la Relativité en particulier Ph.Tourrenc, s'est engagé dès 1980 dans l'étude d'une antenne gravitationnelle à interférométrie laser. D'abord dans le cadre du laboratoire de l'Horloge Atomique d'Orsay, puis rattaché au laboratoire de Physique Théorique de l'Institut Henri Poincaré à Paris (mais installé dans des locaux du CSNSM), le groupe émerge en fait à trois secteurs du CNRS (SPI, Mathématique et Physique de Base et TOAE), ... mais il est officiellement piloté par l'INSU. Une structure de concertation entre expérimentateurs et théoriciens - en relativité et en astrophysique - a été mise en place, sous la désignation de "GROG" (groupe de recherche sur les ondes gravitationnelles) qui reste en l'attente d'un statut. Jusqu'à maintenant, ce flou ne paraît pas avoir été préjudiciable. Par ses performances, avec seulement 3 chercheurs permanents, plus un quatrième rattaché à un autre laboratoire mais très associé aux travaux, le groupe s'est d'ailleurs constitué une bonne audience auprès des équipes engagées dans ce type de recherche (USA, UK, RFA ...); il a su maintenir la liaison avec la collectivité internationale de l'Optique Quantique et aussi établir des liens avec plusieurs entreprises européennes principalement dans le domaine des lasers (BMI, Quantel et MBB).

Depuis environ 4 ans, une collaboration pour VIRGO a été amorcée avec l'équipe de A.Giazotto du laboratoire INFN de Pise (It.). Les progrès ont été rapides, grâce en particulier à une bonne répartition des efforts, les Italiens se chargeant des suspensions antisismiques tandis que le groupe français continuait de développer les techniques d'interférométrie - recyclage, lasers YAG, asservissements de lasers ... - et réalisait la simulation numérique de l'optique des faisceaux. En Avril 1989, un rapport détaillé a été soumis simultanément au CNRS et l'INFN. Assuré du soutien déterminé du laboratoire de Pise, l'INFN a statué très vite, incluant ce projet dans son plan pluri-annuel sous la seule réserve d'un accord de collaboration avec le groupe d'Orsay. Le CNRS a désigné en Novembre un comité d'évaluation dont le rapport sera déposé en Mars.



Au plan international, plusieurs projets sont envisagés; trois antennes seront très probablement programmées dès 1991. Aux USA, les groupes du MIT et de Caltech ont fusionné en un projet unifié de deux antennes, le projet LIGO, que la NSF a placé en forte priorité (tandis que des antennes dans l'espace sont envisagées). En Europe, le groupe de Glasgow s'est associé avec le groupe du Max Planck de Garching. Un comité d'évaluation vient d'être mis en place de concert entre le SERC (UK) et le BMFT (RFA), avec une volonté affichée d'aboutir à une décision d'ici Juillet 1990.

La question qui nous est posée, au titre du groupe d'évaluation, peut être formulée dans les termes suivants:

- 1) Le projet VIRGO est-il nécessaire?
- 2) Les objectifs sont-ils réalistes et les moyens à hauteur?
- 3) Conditionne-t-il un avenir?

Sur l'utilité intrinsèque de VIRGO, il n'est pas facile d'être catégorique. La nécessité de coïncidences pour valider les signaux plaide pour la construction simultanée de plusieurs antennes, mais il y en aura bientôt trois, indépendamment de VIRGO. En outre, s'agissant, dans l'approche interférométrique, d'un projet de première génération, on peut aisément arguer qu'il est prudent d'attendre les résultats des autres pour ne s'engager qu'à coup sûr. S'il y a une nécessité, c'est surtout en terme de la question 3) qu'il faut l'envisager.

Au plan des techniques, les chances de tenir les objectifs de sensibilité, au moins à terme, nous ont paru très sérieuses. La fiabilité de l'équipe du projet VIRGO est une question qui nous a un moment retenue. Le groupe français est faible aux plans numérique et structurel. Mais il est très compétent sur les questions d'optique, les plus spécifiques à la méthode envisagée. Le groupe italien est plus structuré et il dispose en son sein de chercheurs venant de grands projets (Aleph). La compétence acquise sur les suspensions anti-sismiques est complémentaire de celle du groupe d'Orsay. Enfin, l'examen détaillé et très attentif des dossiers techniques, en particulier pour les éléments lourds tel que les tubes à vide, nous a convaincu que le projet était très correctement envisagé par ses auteurs tant Italiens que Français.

La réponse à la troisième question est en fait le point clef, puisqu'elle oriente non seulement la décision de principe, mais aussi ses modalités d'application. Sur l'importance des enjeux scientifiques, je me suis exprimé plus haut. Quant aux chances que les détecteurs de ce type soient les premiers à atteindre la sensibilité requise, on ne peut être devin, mais elles paraissent bonnes. Prenant donc cette hypothèse, il faut alors se placer dans la perspective des étapes ultérieures qui, en cas de succès des premiers projets, se situeront à une toute autre échelle de coût et de complexité et jalonneront, pour quelques décennies, tout un secteur nouveau d'activité. Dans cette perspective, il ne suffit plus que le projet soit viable. Il faut qu'il

puisse être l'occasion pour une plus large collectivité que le groupe actuel d'acquérir l'expérience nécessaire tant au plan instrumental qu'au plan de l'analyse (astro)physique. L'investissement financier qu'exige la réalisation de VIRGO serait mal rentabilisé si le groupe de A.Brillet ne pouvait être rapidement renforcé, éventuellement par osmose avec d'autres groupes et par l'engagement de jeunes chercheurs. Un bon équilibre dans la collaboration franco-italienne ne pourra d'ailleurs être maintenu qu'à cette condition; le groupe de Pise est aujourd'hui mieux structuré (et mieux soutenu), mais du côté français il y a aussi de très bons atouts: une solide compétence sur les points les plus spécifiques à la méthode et aussi, une liaison déjà en place avec les théoriciens de la relativité et de l'astrophysique.

En fin de compte, la conclusion de notre travail d'évaluation devrait être adressée, tout autant qu'à ses commanditaires, à l'ensemble de nos collègues; je vous suis d'ailleurs gré de m'en donner une occasion dans le cadre de ce Conseil Scientifique. En effet, le projet VIRGO pourrait constituer une bonne opportunité - en particulier pour les chercheurs de l'IN2P3 - pour intervenir dans ce domaine des ondes de gravitation; or il ne s'agit pas là d'une décision qui puisse relever des seules instances de Direction.

Paris le 10-2-1990

## Visites à l'étranger

	Désignation	Date	pages
1.	Visite à Pise (13 Janvier)	18 Mars	5 p.
2.	Visite UK (2 Février)	9 Février	3 p.
3.	Visite USA (12, 13 et 14 Février)	25 Février	6 p.
4.	Visite à Garching (15 Mars)	18 Mars	3 p.



## Visite à Pise

Laboratoire INFN-Pise (San Piero di Grado)

le 13 Janvier 1990

### Ont participé aux discussions:

- du comité d'évaluation: *P.Couturier, F.Dupont, P.Fleury, R.Klapish,*
- du groupe VIRGO: *A.Brillet, C.N.Man, A.Marraud, Ph.Tourrenc*

### Nous avons rencontré les personnes suivantes:

- le directeur de l'INFN-Pise: *R. Castaldi,*
- le président du section-II de l'INFN: *P. Strolin,*
- les membres italiens du projet
  - Laboratoire de Pise: *A.Giazotto, C.Bradascia,*
  - Departamento de Fisica, Naples: *L.Milano,*
- deux chercheurs non-européens représentant des groupes intéressés par VIRGO:
  - University of Illinois, Urbana (USA): *L.Holloway,*
  - Observatorio Nazional, Rio de Janeiro (Brésil): *N.O.Santos.*

D'autres chercheurs associés au projet VIRGO (dont P.Hello, M.Pham Tu et J.Y.Vinet) étaient aussi à Pise, pour deux journées de travail. Nous les avons tous rencontrés lors du dîner du groupe, le soir de notre arrivée.

Nous nous sommes réunis le matin et l'après-midi; et, entre ces deux séances, nous avons visité les suspensions prototypes actuellement en cours de tests.

## I. Le laboratoire de Pise, et l'équipe VIRGO

### 1) Le laboratoire INFN-Pise

Le laboratoire de Pise - en fait situé à San-Piero près de Tirrénia, à une trentaine de km à l'ouest de Pise - est principalement engagé sur des expériences auprès des grands accélérateurs. Les participations sont très nombreuses: CDF au Fermi-lab, ALEPH au CERN, une expérience à Serpukov etc... . Le laboratoire est aussi engagé sur l'expérience MACRO au Gran-Sasso.

Une ouverture vers l'astrophysique est en cours avec, outre MACRO, un projet de recherche des sources cosmiques de gamma au centre de la galaxie - le projet CLUE - et bien sûr, le projet VIRGO.

Au niveau technique, bien que le laboratoire ne dispose pas d'un effectif d'ingénieurs et de techniciens aussi nombreux qu'un laboratoire français d'activité comparable, il s'est constitué de solides compétences dans la réalisation des grands détecteurs. La participation directe des physiciens et des étudiants à ce type de travail y est traditionnellement très forte.

\* Cette note n'a été malheureusement rédigée que plusieurs semaines après notre visite.

## 2) L'équipe VIRGO, les suspensions antisismiques

Bien que la participation italienne au projet ait été initialisée, par A.Giazotto, à partir du laboratoire de Pise, l'actuelle équipe VIRGO comporte à peu près autant de physiciens de Naples et de Frascati que de Pise. Cette équipe comporte environ 13 chercheurs à plein temps.

Jusqu'à présent, l'activité a porté principalement sur les suspensions antisismiques. Les performances visées ont été d'entrée de jeu très ambitieuses pour des atténuations, par des méthodes statiques, des mouvements verticaux mais aussi horizontaux. Les solutions élaborées mettent en oeuvre diverses astuces de mécanique; et la réalisation en vraie grandeur de deux prototypes ont permis de valider la méthode, mettant en évidence une excellente atténuation dès les fréquences de  $\approx 10$  Hz. Ce travail confère à VIRGO un avantage notable (les groupes engagés sur les autres projets d'antennes, jugeant le dispositif trop sophistiqué, n'envisagent pas dans une première étape de le recopier).

Lorsque nous avons visité le hall dans lequel sont installés les deux grands portiques auxquels sont accrochés les prototypes, un dispositif de mesures des bruits sismiques résiduels par interférométrie laser était en cours d'assemblage, avec participation de l'équipe d'Orsay.

## II. Discussions

### 1) Evaluations chiffrées

Nous demandons à F.Dupont d'exposer les conclusions du groupe de travail sur les chiffrages présentés dans le rapport VIRGO (le rapport vert).

F.Dupont fait état de la bonne impression d'ensemble sur les évaluations techniques et financières faites par le groupe VIRGO - évaluations qui ne sont d'ailleurs pas toutes contenues dans le document - . Il souligne néanmoins un certain nombre de cas où une sous-évaluation apparaît comme très probable. En particulier, le tube à vide qui constitue un des éléments principaux du budget paraît notoirement sous-estimé. Les bâtiments de l'antenne sont sans doute trop exigües, et les bâtiments annexes - pour loger les équipes au cours de la construction - sont inexistantes. Une réévaluation des personnels nécessaires s'impose aussi.

De façon très globale, nous considérons qu'une correction d'environ 30% sur l'ensemble de tous les chiffres doit être envisagée.

Ce point de vue n'est pas considéré comme irrecevable par nos interlocuteurs, bien disposés d'ailleurs à relancer certaines enquêtes techniques sur la base de données actualisées.

### 2) Risques techniques

Les incertitudes concernant les performances espérées de VIRGO font l'objet d'une discussion. Deux points ont retenu l'attention:

a) Les bruits thermiques au niveau des suspensions, bien que probablement évalués de manière pessimistes, justifient de travaux plus approfondis. C'est un domaine complexe qui demanderait à la fois une modélisation - faisant appel à des compétences pluridisciplinaires - et à des tests.

b) Les grands miroirs pour la réalisation desquels l'industrie n'est pas actuellement équipée, d'où au moins un risque de délais. A.Brillet fait valoir qu'on peut raisonnablement envisager un démarrage de l'antenne avec des miroirs correspondant à des exigences moindres que celles évoquées dans le rapport. Apparaît donc à cette occasion la nécessité de définir une phase de démarrage qui de fait est absente du rapport VIRGO.

### 3) Répartition des tâches

A.Brillet ouvre cette phase de la discussion en commentant l'organigramme du projet. Cette présentation met en évidence les grandes lignes de répartitions entre les charges qui relèveraient du groupe de Pise ou du groupe d'Orsay:

- a) Orsay : l'optique (laser, interférométrie, miroirs...),
- b) Orsay+Pise : le système de vide,
- c) Pise : les suspensions antisismiques, le génie civil.

Cette répartition est en fait déjà réalisée puisqu'elle correspond à la répartition des travaux préliminaires. Le système du vide est étudié aussi bien à Orsay (A.Marraud) qu'à Pise; les évaluations n'ont d'ailleurs pas totalement convergé. Les problèmes aux interfaces, entre optique et suspensions, ne sont sans doute pas trop nombreux; ils sont activement pris en compte. Ainsi, la qualification des suspensions antisismiques par interférométrie laser fait actuellement l'objet d'une étude, à Pise, sous la direction de C.N.Man d'Orsay et avec la participation d'un étudiant italien.

### 4) Le site de Cascina

La proposition d'un site italien, à Cascina à une vingtaine de km du laboratoire de Pise, est évoquée. La proximité est un atout important; ce choix ne paraît devoir créer de difficulté du point de vue français, du moins dans l'hypothèse d'un projet financé à plus de 50% par l'Italie.

Selon l'enquête sismique, faite par l'équipe de Pise, le site paraît adéquat. Les sources de bruits les plus sérieuses pour une antenne, plutôt que des perturbations d'origine sismique, relèvent soit des bruits générés par les activités humaines (routes ou autoroutes, couloirs aériens etc...) soit des effets du vent. Concernant le premier point, Cascina est suffisamment éloigné des zones de trafic. Sur le second point, le site est sans arbres (ce qui est préférable en cas de vents faibles ou moyens).

### 5) Vers un protocole de collaboration

Une discussion est engagée sur l'élaboration d'un protocole de collaboration, bien que ni P.Couturier du côté français, ni P.Strolin ni R.Castaldi du côté italien, ne se considèrent comme mandatés par leurs directions respectives (et a fortiori aucune autre personne présente).

Il est admis qu'en tout état de cause, le projet devra être placé sous la direction d'un unique directeur de projet pour toute la durée de la construction.

P.Couturier privilégie une structure de société internationale, disposant d'un grand niveau d'autonomie, sur le modèle du synchrotron de Trieste. Il en prend occasion pour demander qu'une évaluation des coûts incluant tous les salaires soit préparée à toutes fins utiles.

P.Strolin et R.Castaldi envisageraient plus volontiers une structure qui resterait sous la juridiction du pays d'accueil, voir même sous la juridiction de l'organisme de tutelle scientifique. Plus précisément, en supposant que la proposition d'un site italien soit retenue, il leur paraît souhaitable que le projet ait une structure semblable au laboratoire du Gran-Sasso.

R.Castaldi s'engage au nom du laboratoire de Pise à un soutien déterminé du projet, ce qui sera particulièrement utile si le site est à proximité.

A.Giazotto soulève le problème de la double appartenance des équipes, d'une part vis-à-vis de leur laboratoire d'origine, et d'autre part du nouveau laboratoire créé pour le projet. Concernant sa propre équipe, il souhaite qu'elle puisse continuer de s'appuyer sur le laboratoire de Pise tout au long de la phase de construction.

R.Castaldi l'assure que, de son point de vue, ceci ne posera pas de problème de principe, pourvu que les besoins en personnels soient dûment établis par avance et que des postes soient ouverts car les demandes de l'équipe dépasseront le niveau auquel peut prétendre normalement toute équipe du laboratoire. De manière générale, les moyens attribués par la partie italienne au projet VIRGO, en personnels et en financement, pourraient être gérés, au moins dans une première phase, par le laboratoire de Pise.

La proximité du site devrait permettre de faire en sorte que le laboratoire VIRGO reste à l'état d'un "laboratoire sans mur" jusqu'à ce que le génie civil soit achevé et les installations de vide soient suffisamment avancées pour que les physiciens puissent y travailler utilement. Dès le début du projet, même sans mur, le laboratoire VIRGO avec sa structure propre de direction constituera le cadre des décisions et des rapports avec les groupes des autres projets d'antennes.

#### 6) Participation de pays autres que l'Italie et la France

Des chercheurs de plusieurs pays non-européens ont manifesté leur intérêt pour une éventuelle participation au projet VIRGO. Ce sont principalement une équipe américaine autour de L.Holloway et un ensemble d'équipes du Brésil représentées, lors de la réunion, par N.O.Santos. Ces deux associations éventuelles se présentent sous des formes différentes.

L.Holloway, professeur à l'Université d'Illinois à Urbana, est associé de longues dates à des activités du laboratoire de Pise dans le domaine de la Physique des Hautes Energies. Actuellement en détachement sabbatique à Pise, il contribue aux travaux sur les suspensions, prenant en charge la réalisation du guidage des miroirs, sur lequel il a déjà obtenu d'excellentes performances. Souhaitant impliquer dans cette activité un petit groupe de son université, il a demandé un soutien financier à hauteur de cet enjeu auprès de la NSF. Il nous a semblé qu'une participation de ce type



devait en effet être encouragée puisqu'elle donnerait une certaine ouverture au projet VIRGO, sans entraîner une forte modification du contexte d'une collaboration bi-partite.

La proposition d'une participation brésilienne est d'une toute autre nature. N.O.Santos a fait état de 3 groupes expérimentaux et d'une somme actuellement négociée d'environ 50 M Frs, somme qui ne pourrait être dépensée que sur place au Brésil. Le profil des compétences et le type de participation des équipes ne pouvaient pas être évoqués très concrètement par N.O.Santos qui n'est pas membre d'aucune de ces équipes (il est d'ailleurs théoricien). Sans vouloir conclure trop rapidement, force est de constater que cette association ne paraît pas aisément intégrable au projet, du moins dans sa phase initiale.

Patrick Fleury

---



**Visite à Londres**  
**auprès des responsables du projet Anglo-Allemand**  
**d'antenne gravitationnelle**

le 2 Février 1990

**Participation française:**

Jacques BORDE, Représentant du CNRS à Londres.

Patrick FLEURY, Président du groupe d'évaluation du projet VIRGO, et  
Philippe TOURENC, Directeur du laboratoire de Physique Théorique de  
l'Institut Henri Poincaré (auquel le groupe du projet VIRGO est rattaché).

**Participation anglaise:**

Ian CORBETT, Membre du SERC et du Rutherford Lab.

Jim HOUGH, Responsable U.K. du projet d'antenne

Notons d'abord que les participants se connaissaient et que la conversation s'est déroulée dans un climat très détendu. Nous avons consacré près de 5 heures à cette discussion, y compris le repas.

**I. Au niveau des institutions UK, RFA**

1) Le coût estimé correspond à environ 250 Mfrs (HT et hors personnel), donc très voisin du coût de VIRGO.

2) Le SERC a déjà décidé de placer ce projet dans ses priorités de financement à niveau de 5.5 M-Livres - au lieu de 4 M-Livres envisagées encore récemment - et que le projet devrait être soumis au "Research Council" avant l'été (donc vers Juillet).

3) Le BMFT s'est engagé à piloter l'opération, coté RFA, assurant en particulier la coordination des diverses instances allemandes de financement. La RFA assurerait la plus grande part du financement. Notons que Herbert Walther, directeur du Max Planck de Garching, s'est engagé personnellement dans le projet.

4) Un comité mixte UK-RFA est actuellement mis en place; il devra déposer un premier rapport avant le mois de Juillet, en vue des décisions de financement pour 1991.

## II. Au niveau du projet

(le projet n'a pas encore été doté d'une désignation ou d'un sigle)

- 1) En ce qui concerne les choix techniques, un accord sans faille est affiché:
  - on commencera par un dispositif de "ligne à retard" jugé moins risqué, qu'on remplacera ultérieurement par un Fabry-Perot, alors que LIGO, aux USA, et VIRGO envisagent directement le Fabry-Perot.
  - le laser sera dès le départ de type YAG, avec doublement de fréquence; VIRGO utiliserait le YAG sans doublement de fréquence. LIGO envisage de commencer avec un laser à Argon puis de passer au YAG avec doublement.
  - le tube à vide sera de  $\approx 1.25\text{m}$  de diamètre utile, comme pour LIGO, permettant d'accommoder deux optiques simultanément; VIRGO propose un diamètre utile  $\leq 1\text{m}$ .
- 2) Le choix du site devrait être fait d'ici un mois environ. Un site est proposé à 80 km de Glasgow. Les Allemands proposent un ou deux sites près de Hanovre (donc très éloigné du Max Planck de Munich).
- 3) Le Rutherford Lab propose de prendre en charge la réalisation du système de vide - au titre d'un laboratoire de service - sans qu'aucun chercheur du laboratoire ne soit impliqué (sauf I. Corbett qui supervisera).
- 4) Les éléments critiques du projet - optique et suspension antisismique seront pris en charge conjointement par Glasgow et Munich. Des séjours croisés sont prévus.
- 5) Une large partie de l'activité scientifique sera préservée, de part et d'autre, pour les travaux en labo en vue des étapes ultérieures.

## III. Relations avec LIGO (USA)

Les contacts avec le projet US sont très actifs, aussi bien au plan des institutions (NSF via Bardon et Isaacson), qu'avec les membres du projet LIGO. Les discussions concernent tous les aspects techniques. Elles ont aussi concerné la phase de sortie de résultats qui devraient normalement comporter la mise en évidence simultanée des mêmes événements cosmiques. Le débat concerne en particulier la "propriété" scientifique de ces résultats.

Notons que le groupe VIRGO a participé à plusieurs rencontres USA-Europe et que ses membres sont conviés à une réunion aux US en Avril.

## IV Relations avec VIRGO

La plus grande cordialité est affichée vis-à-vis de VIRGO, teintée peut-être de condescendance vis-à-vis du dernier né. Le haut niveau de "professionalisme" de l'équipe de A.Brillet est volontiers évoqué, de la part de chercheurs venus à l'optique et à l'interférométrie laser à l'occasion de l'enjeu gravitationnel. Les hautes performances obtenues à Pise pour la suspension antisismique, par l'équipe de Giazotto, sont elles aussi volontiers reconnues.

Nous avons tenté de plaider l'importance d'une politique européenne en la matière. Nous avons souligné le fait que nos collègues américains aient voulu disposer d'une autonomie, en s'engageant dans un programme avec deux antennes qui leur permettra de valider les observations par les coïncidences.

Nos interlocuteurs ont revendiqué une totale sérénité vis-à-vis de ce contexte qu'ils jugent contrôlable par le fait d'une bonne entente avec LIGO.

Ils ne souhaitent pas qu'une structure européenne soit envisagée dans la phase actuelle, préférant qu'aboutissent d'abord leurs actuelles négociations avec la RFA.

Néanmoins, de lui-même, I. Corbett a émis la suggestion, qu'au delà des décisions concernant l'un et l'autre projets européens, un comité consultatif puisse être chargé de suivre le bon déroulement en Europe des travaux sur les ondes gravitationnelles par interférométrie laser.

### **Conclusions**

Une dynamique paraît engagée pour un programme international sur les ondes gravitationnelles par interférométrie laser. Les efforts de concertation ont été nombreux, en particulier à l'initiative de M. Bardon (USA).

Dans le processus en cours, les USA ont l'initiative. Avec deux antennes simultanées pilotées par une même équipe, ils se sont assurés d'une autonomie.

Dans la collaboration UK-RFA, la partie anglaise paraît disposer à jouer le jeu du partenaire externe. Il faudra que nous ayons aussi des discussions sur ces mêmes thèmes avec la partie allemande, en particulier avec H. Walther.

De toute façon, le projet franco-italien n'est pour l'instant pas assez visible pour qu'une concertation européenne puisse être sérieusement prise en compte. Je pense qu'il urge de mener à terme le débat engagé en France (où le projet commence tout juste à être suffisamment visible).

Un report à 1991 de toute décision de principe du côté français (alors que l'INFN a déjà fait connaître son souhait de collaboration) hypothèquerait sérieusement les chances pour la suite.

Avant décision, il paraît souhaitable qu'à l'occasion de contacts internationaux à haut niveau, le débat soit amorcé de façon à préserver toutes opportunités.

Patrick Fleury



**Visite aux USA**  
**NSF.(Washington), Caltech, MIT**

les 12, 13 & 14 Février

Participaient à ce déplacement: A.Brillet & P.Fleury

12 Février MIT: R.Burka, D.Shoemaker, R.Weiss

13 Février NSF: M.Bardon, R.Isaacson

14 Février Caltech: A.Abramovici, R.Drever, Y.Gürsel, F.Raab, R.Vogt, M.Zucher

**Visite à la NSF (Washington)**

M. Bardon \* est le responsable du secteur Physique à la NSF; R.Isaacson est son adjoint pour la Gravitation. M.Bardon s'intéresse aux recherches sur les ondes gravitationnelles depuis près de 20 ans: par les cylindres de Weber, puis par interférométrie laser. La NSF finance depuis environ 10 ans les deux groupes de R.Weiss au MIT et de R.Drever au Caltech.

En 1986, le projet de deux antennes interférométriques est soumis pour la première fois. Le "Science Board" de la NSF retient le projet dans son principe et exprime des recommandations, en particulier que deux antennes semblables soient construites sous la responsabilité d'un chef de projet unique.

Les deux groupes du MIT et du Caltech sont des groupes universitaires typiques: un professeur, un ou deux chercheurs permanents. Les étudiants y sont peu nombreux car l'enjeu paraît trop lointain.

Suite aux recommandations du "Science Board", Caltech propose, comme chef de projet commun, R.Vogt que les deux groupes acceptent. Le projet reçoit la désignation de "LIGO".

En 1988, M.Bardon, soutenu par Bloch directeur de la NSF, obtient pour LIGO l'assurance d'un financement. R.Vogt déclare qu'il n'est pas prêt; il s'engage à fournir pour la fin 1989 un rapport de projet, aujourd'hui déposé (rapport non public mais dont on nous a donné copie). Une semaine de discussion aura eu lieu au Caltech - du 19 au 23 février - donc juste après notre passage, entre les représentants de la NSF et les membres du projet.

---

\* Marcel Bardon est français naturalisé américain. Après des études de lettres en France, il fait un PhD en Physique des particules, à Columbia. Il y rencontre L.Lederman, J.Steinberger... Il est depuis 20 ans à la NSF, au sein de la section de Physique qu'il dirige aujourd'hui.

Le financement du projet est inscrit pour 192 MS au "budget du Président" qui constitue l'ensemble des propositions de dépenses publiques soumises à l'approbation du Congrès pour la prochaine année budgétaire qui commence au 1<sup>er</sup> Octobre (1990). Les discussions entre la NSF et les représentants du Congrès se sont engagées le lendemain même de notre passage à Washington; un accord pourrait être acquis à bref délai, mais l'attente pourrait aussi s'étendre jusqu'à l'échéance d'Octobre.

Entre-temps, le rapport de projet sera à nouveau examiné par le "Science Board" de la NSF sans que l'accord sur le fond, acquis en 1986, ne puisse normalement remis en cause. Cette phase ne paraît pas présenter d'aléas, en particulier du fait du soutien du Directeur (Bloch quittant la Direction de la NSF à la fin de cette année, il est d'autant plus souhaitable pour les tenants du projet que l'affaire ne soit pas différée).

M.Bardon exprime une confiance sans réserve à R.Vogt qui de fait a su mettre en place une structure au sein de laquelle les deux équipes du MIT et du Caltech commencent à collaborer. L'équipe de Drever étant sur place, au Caltech, est essentiellement intégrée; celle de Weiss l'est aussi à un certain point. M.Bardon regrette que le soutien du projet par le MIT ne soit pas à hauteur de celui du Caltech. En particulier, le départ récent de Saulson qui était très proche de l'équipe de Weiss a provoqué un sérieux traumatisme.

Près d'une dizaine de sites sont proposés et donc autant d'Etats potentiellement intéressés; le choix des deux sites ne se fera qu'après l'approbation du projet par le Congrès.

Pour M.Bardon, il faut certes deux antennes pour valider, par coïncidences, les premiers signaux observés, mais ces antennes doivent aussi constituer les premiers éléments d'un réseau planétaire qui sera nécessaire pour les études astronomiques ultérieures. L'enjeu astrophysique est considéré comme essentiel, en conséquence de quoi,

- chacune de ces deux antennes est conçue pour le long terme. Les bâtiments seront suffisamment spacieux pour n'avoir pas à recourir ultérieurement à du gros oeuvre au voisinage immédiat de dispositifs fragiles (et vulnérables à tout empoussièrage). Les chambres à vide et les tubes devront être suffisamment grands pour pouvoir accommoder plusieurs dispositifs d'optique, relevant éventuellement de plusieurs équipes. Il s'agit donc de créer des "facilities" au sens anglais du terme.

- la collaboration avec les autres pays sera activement recherchée, de façon à réaliser dès que possible ce réseau planétaire d'antennes. M.Bardon se revendique à juste titre d'avoir pris des

---

**Note** Après notre discussion avec M.Bardon et R.Isaacson, nous avons rencontré Michel Aubry, l'attaché scientifique auprès de l'ambassade de France à Washington. A son avis, le programme américain concernant la détection des ondes de gravitation par interférométrie laser sera très probablement engagé dès cette année. En particulier, il considère que la diminution des dépenses militaires facilitera les discussions au Congrès sur les financements de la recherche; de toute façon, le projet LIGO reste "dans l'épaisseur du trait".

Le représentant du CNRS à Washington, A.Lumbroso, que nous n'avons pas pu rencontrer sur place mais à Paris, avant notre déplacement, nous avait donné un même point de vue.



initiatives en ce sens. Il a organisé une réunion en 1989 à l'Institut Henri Poincaré au cours de laquelle des groupes de travail inter-projets ont été mis en place (le groupe laser est dirigé par A.Brillet et le groupe de simulations d'optique par J.Y.Vinet). Si ces groupes n'ont pas réellement commencé à fonctionner, c'est peut-être du au fait que tous les chercheurs ont été très occupés par la rédaction des divers rapports de projets, LIGO, VIRGO et le projet UK-RFA. Par ailleurs, M.Bardon vient de proposer une réunion des responsables de ces projets, le 20 Avril prochain à Washington.

### Visite au MIT

Nous rencontrons d'abord, le dimanche soir, David Shoemaker qui a rejoint depuis trois mois le groupe du MIT après cinq années en Europe, deux au Garching et trois chez A.Brillet. Il paraît optimiste quant à la dynamique actuelle concernant LIGO, et il est tout-à-fait réintégré au groupe du MIT dont le poids au sein du projet reste indécis. Il évoque le traumatisme créé par le départ récent de Saulson (qui bien que théoricien était fortement impliqué dans les travaux du groupe expérimental).

Raines Weiss qui, le lundi, nous consacre sa journée. Il dirige une équipe peu nombreuse au sein de laquelle les relations semblent cordiales. Le groupe participe à des études d'astronomie infra-rouge, mais l'activité principale est orientée sur LIGO. R.Weiss reconnaît volontiers que R.Vogt, au Caltech, a su donner une forte impulsion au projet, mais il regrette que le MIT ait cédé l'initiative. Il craint que, faute d'un soutien suffisamment déterminé de son Université, son groupe soit marginalisé; mais il fait état d'une évolution favorable des responsables des départements de Physique et d'Astrophysique. Il regrette le départ de Saulson, et il se réjouit de l'arrivée de Shoemaker.

L'équipe LIGO du MIT comporte 3 seniors permanents - Mike Burka, David Schoemaker et Raines Weiss - assistés d'un seul technicien plein temps (plus un ou deux occasionnels); on notera qu'il n'y a pratiquement pas de services généraux au niveau du département ou de l'université. Un étudiant "graduate" travaille avec Shoemaker. La participation d'étudiants plus nombreux est freinée par l'absence de résultats dans un projet où la métrologie optique n'est pas considérée comme une fin en soi.

Engagé depuis 10 ans dans cette activité, le groupe a construit une antenne prototype avec deux bras de 1.5m qui n'est plus utilisée. Un nouveau dispositif est partiellement en place comportant deux bras de 5m de longueur, et 1m de diamètre, associés à des chambres d'expérimentation de grandes dimensions. L'enjeu n'est pas nécessairement la réalisation d'une nouvelle antenne prototype, mais plutôt de pouvoir tester des éléments des antennes définitives.

Pour le moment le groupe doit étudier les systèmes de suspension et établir d'ici Octobre les spécifications pour LIGO. Il doit aussi étudier l'ensemble de la métrologie interférométrique. Enfin, le groupe doit participer à la mise-en-oeuvre des logiciels de simulation de l'optique.

Sur ces trois points, on notera que l'équipe du projet VIRGO surclasse nettement celle du LIGO tant sur la hauteur des objectifs de démarrage que sur l'avancement des travaux. La suspension envisagée pour LIGO est plus simple et de moindre performance aux basses fréquences que celle déjà testée à Pise. Le laser initial sera à Argon, reportant à une phase ultérieure l'installation d'un YAG (qu'on couplera à un doubleur de fréquence de façon à rester dans le vert, lorsque le groupe de Byer, à Stanford, aura maîtrisé cette technique). Enfin concernant les simulations des faisceaux, rien n'a encore été fait alors que J.Y. Vinet exploite depuis quelque temps déjà un logiciel écrit par lui. Le groupe LIGO vient d'acquérir un logiciel, écrit initialement au Livermore, qui devra donc être adapté.

### Visite au Caltech

Dès notre arrivée au Caltech, nous sommes pris en main par Robie Vogt, énergique et jovial. Il a travaillé dans divers domaines de la recherche: Physique des particules, rayonnement cosmique, Astrophysique. Il a assuré plusieurs fonctions de haut niveau, en particulier à la direction du Jet Propulsion Laboratory du Caltech, et plus récemment il était "Provost" de l'université. Il se définit, dans le contexte du projet LIGO, comme astrophysicien, les chercheurs le perçoivent d'abord comme un manager faisant peut-être plus aisément confiance aux ingénieurs qu'à eux-mêmes.

R. Vogt a été désigné en 1987 responsable du projet LIGO; il en est aujourd'hui le "Principal Investigator" ainsi que le "Project Leader" (ces deux titres figurent en page de garde du rapport de projet, donc en tête des 4 "co-investigators" Drever, Raab, Thorne & Weiss). Quand nous lui avons demandé s'il existait un "Steering Committee", il a frémi d'horreur devant un concept si contraire au libéralisme américain et à sa propre conception d'une responsabilité pleine et entière; sa seule tutelle est la NSF ramenée au seul rôle du bailleur de fonds. Sa responsabilité s'étend aussi bien sur les infrastructures et équipements de base (enceintes à vide) que sur l'optique, les laser, la suspension. Son autorité s'exerce donc tout autant sur les ingénieurs et techniciens que sur les chercheurs; et lorsque nous évoquons l'équipe de Drever, il précise qu'il y avait une équipe de Drever et une équipe de Weiss et qu'il n'y a plus aujourd'hui qu'un seul projet LIGO.

Sur les perspectives à moyen et long termes, R. Vogt revendique les mêmes points de vue que M. Bardon. Il minimise l'importance d'une première mise-en-évidence d'ondes gravitationnelles, souhaitant presque, pour la clarté des choses, que cette étape soit réalisée avant le démarrage de LIGO - de toute façon ironise-t-il le prix Nobel ne serait pas pour lui - par les cylindres de Weber. Ce qui lui importe est d'installer les premières bases d'un réseau planétaire d'antennes interférométriques. C'est dans cette perspective qu'il situe son souhait pour une collaboration internationale. Dans la phase de démarrage, cette collaboration lui paraît trop confuse pour être vraiment efficace car il aurait fallu confier toutes ces réalisations à un unique chef de projet; il ne se serait pas recusé pour ce rôle. Il reconnaît volontiers la très grande compétence de l'équipe d'A. Brillat - la seule, dit-il, qui ait produit des publications, auxquelles LIGO puisse se référer - et

---

il apprécie aussi les performances de la suspension réalisée par A.Giazotto à Pise. En tout état de cause, il prône l'importance des contacts directs; il souhaite se rendre souvent en Europe et accueillera très volontiers toutes visites au Caltech.

Pour la phase de construction des deux antennes du LIGO, R.Vogt entend réunir autour de lui, au Caltech, une forte équipe de 40 à 50 membres. Par avance, en l'attente des financements, il s'est assuré des locaux nécessaires qu'il a fait réaménager. Au niveau des services techniques - électronique et mécanique - l'équipe sera essentiellement autonome (faute de moyens généraux au niveau du département, dont le principe lui paraît d'ailleurs être une hérésie). Les membres de l'équipe seront peu sollicités sur les lieux d'implantation des antennes; les travaux au Caltech se prolongeront, au delà de la période de démarrage, pour la mise-au-point de dispositifs plus performants. Sur chaque site, 10 à 12 techniciens permanents seront embauchés pour assurer une surveillance continue par postes de deux.

Dans la phase des pré-études, jusqu'à la rédaction du rapport de projet soumis fin 1989 à la NSF, l'accent a été mis sur les infrastructures et les enceintes à vide, conçues de manière à accommoder un éventail d'éventualités aussi large que possible concernant en particulier les variantes déjà repertoriées en terme du repliement de faisceau (ligne à retard / cavité Fabry Perrot). Comme il est dit plus haut, LIGO aura le caractère d'une "facility", en ce sens qu'il sera possible d'y accueillir diverses équipes qui pourront travailler simultanément. R.Vogt affirme, chiffres à l'appui, que le surcoût du LIGO (190 MS) par rapport aux deux projets européens ( $\approx 250$ MFr), n'est imputable que marginalement au plus grand dimensionnement des moyens généraux - bâtiments et enceintes d'expériences - la différence étant surtout due aux salaires qui ne figurent pas dans les évaluations européennes.

Pour l'instrumentation initiale - optique et suspension - on évitera les risques (avec peut-être l'arrière-pensée que les chercheurs seront plus crédibles au delà d'une phase d'intégration non encore achevée). Lors de notre visite au MIT, nous avons eu occasion de percevoir le décalage entre VIRGO et LIGO sur ces points. La stratégie de R.Vogt est de constituer un solide laboratoire d'optique au Caltech, comportant plusieurs bancs d'optique versatiles et s'appuyant sur les deux prototypes du MIT et du Caltech (que nous évoquerons plus loin). Autrement dit, Vogt semble convaincu de devoir reprendre, sur des bases moins artisanales, l'ensemble des études déjà réalisées, en s'assurant que les chercheurs soient cette fois assistés d'ingénieurs et de techniciens compétents. Les antennes prototypes du MIT et du Caltech serviront à ces tests \*. Les dispositifs plus sophistiqués de métrologie interférentielle devraient émaner de ces travaux.

---

\* R.Vogt estime que la recherche de performances, en termes de sensibilité, sur les antennes prototypes a entraîné un travail quelque peu disproportionné avec les enjeux réels et qu'en tout état de cause il n'est plus temps d'investir dans cette direction.

**Ronald Drever**

R.Drever est au Caltech depuis une dizaine d'année. Il s'était engagé dès le début des années 70, à Glasgow dans la détection des ondes de gravitation par interférométrie laser. Le groupe de Glasgow, aujourd'hui dirigé par Jim Hough, est associé comme on sait au groupe du Max Planck de Garching pour le projet UK-RFA. Invité au Caltech, à l'instigation de Kip S.Thorne (théoricien de la gravitation), pour y développer cette même activité, R.Drever y a constitué un nouveau groupe.

Si R.Drever a relativement peu publié au cours de ses 20 années d'activité sur ce thème, on lui reconnaît par contre d'avoir été à l'origine de beaucoup d'idées importantes. C'est lui qui a inventé la méthode du recyclage des faisceaux, permettant de réduire par un facteur important la puissance laser utile (méthode testée pour la première fois par A.Brillet).

R.Drever a réalisé au Caltech une grande antenne prototype comportant deux bras de 40 m. Une sensibilité de  $10^{-18} / \sqrt{\text{Herz}}$  y a été obtenue. L'antenne fait actuellement l'objet d'une restructuration progressive, non pas tant pour l'exploiter comme antenne, mais plutôt pour constituer avec celle du MIT un instrument de test. Plus longue que celle du MIT (5 m), mais équipée d'enceintes à vide plus exigües, elle apparaît donc complémentaire.

Même si, dans la phase actuelle, R.Drever n'a sans doute plus le rôle du protagoniste visionnaire qu'il a joué autrefois, ce qu'on peut voir au Caltech porte fortement son empreinte.

Patrick Fleury

Paris le 26-2-1990

## Visite au Max Planck Institut de Garching (Munich, RFA)

le 15 Mars 1990

Prenant occasion d'un déplacement à Garching de A.Brillet et Ph.Tourrenc, j'ai visité, le 15 Mars, le groupe du projet d'onde de gravitation.

A.Aspect était à Garching le 21 Fév., il y a donc environ un mois, pour d'autres motifs; il avait eu alors une discussion avec Herbert Walther, l'un des directeurs du Max-Planck. Le principal message rapporté avait été que toute l'énergie étant présentement focalisée sur la prise d'une décision à deux partenaires, RFA-UK, il importait d'éviter que nous perturbions ce processus. Ultérieurement, lorsqu'une décision sur VIRGO serait en outre acquise, il serait très souhaitable de consolider les liens entre les deux projets européens. Par ailleurs, Karsten Danzmann, le nouveau responsable du groupe, lui avait exprimé le même point de vue, assorti de l'avis que si en face des deux antennes US il n'y en avait qu'une en Europe, la partie serait bien inégale.

### Les 3 instituts Max-Planck de Garching

Situé à une vingtaine de km de Munich, Garching constitue une sorte de campus comportant plusieurs centres de recherche universitaires, et principalement trois instituts "Max-Planck": la Physique des plasmas, l'Astrophysique et l'Optique quantique. Ce dernier, le plus récent, dont le bâtiment a été construit en 1986, abrite actuellement le groupe des ondes gravitationnelles qui était antérieurement rattaché à l'Astrophysique, où d'ailleurs l'antenne prototype est construite. Ces divers instituts du Max-Planck sont essentiellement indépendants les uns des autres. Si des liens existent dans le cas du projet d'ondes de gravitations entre deux de ces instituts, c'est au titre de la contribution d'un groupe de théoriciens appartenant à l'institut d'Astrophysique.

### Le groupe du projet d'ondes de gravitation

Après des travaux sur les cylindres de Weber, le groupe expérimental créé il y a une vingtaine d'années autour de Billing, s'est orienté en 1976 vers l'interférométrie laser (suite aux premières initiatives de Drever en Ecosse et de Weiss aux USA). Au moment du départ en retraite de Billing, en 1985, le groupe n'aurait pu prolonger ses activités s'il n'avait été pris en charge par Herbert Walther, qui participait à cette période à la création du 3<sup>ème</sup> institut, celui d'Optique quantique. Très convaincu de l'intérêt de la détection des ondes de gravitation, H.Walther a beaucoup contribué, depuis lors, à faire émerger un projet d'antenne de grande dimension; néanmoins H.Walther ne se considère pas membre du groupe; outre ses nombreuses activités de direction et d'enseignement, il poursuit ses propres recherches sur les systèmes à faibles nombres d'atomes (dans la mouvance par exemple de Cohen-Tanoudji en France). En fait, la direction du groupe, depuis le départ de Billing, constitue un problème non résolu, sauf peut-être depuis deux mois avec la nomination de Karsten Danzmann (précédemment à Stanford); son prédécesseur dans cette fonction n'avait semble-t-il pas réussi à s'intégrer.

Les membres du groupe, au nombre de 5, connaissent certainement très bien leur domaine; certains d'entre eux sont là depuis l'origine, et sont d'ailleurs proches de la retraite. Dans l'ensemble, ils ont le profil - et aussi le statut - d'ingénieurs de recherche, ce qu'on perçoit par exemple très concrètement quand on visite leur antenne de 30 m. Cette qualification d'ingénieur, volontiers reconnue à l'extérieur, a pu induire une erreur de perspective en ce qui concerne la réalisation d'un grand projet; pas plus que leurs collègues de Glasgow ou du MIT, ces ingénieurs ou chercheurs n'ont accès à des groupes techniques structurés (bureau d'études, ateliers etc...). Les réalisations mécaniques sont confiés à un unique technicien-mécanicien, qui est d'ailleurs le seul technicien à temps complet dans le groupe; d'ailleurs, au sein de l'institut, il n'existe pas de services généraux. Le groupe, conscient de cette faiblesse vis-à-vis du projet d'antenne, escompte le soutien des services techniques du Rutherford-lab. Sur ce chapitre, plutôt qu'un risque de compétition au sein du projet de collaboration entre RFA et UK, il y aurait donc complémentarité.

En cas d'approbation du projet, quelques postes de chercheurs et/ou ingénieurs seraient normalement ouverts. Des étudiants seraient en outre orientés vers ce projet; il n'y en a pas actuellement, car seul Danzmann a les titres universitaires autorisant leur encadrement.

### **Le projet RFA-UK**

Le processus de décision est considéré comme quasi assuré; en même temps, c'est la survie même de l'équipe qui en est perçue comme l'enjeu, après trop d'années sans que la direction en soit assurée. Le tout-récent directeur de l'équipe, K.Danzmann, n'a d'ailleurs accepté ce poste qu'avec la quasi assurance que le projet serait commencé sans délai.

S'il n'y a sans doute pas lieu de mettre en doute cet optimisme, on doit cependant observer que l'organisation proprement dite du projet n'est pas figée et que même certains équilibres risquent d'être reconsidérés. A ce titre, le choix du site n'est pas neutre, et la tendance actuelle pour une implantation auprès de Hanovre ne laisse pas indifférentes les autorités scientifiques de cette région. Un groupe du Centre de Laser et de l'Institut d'Optique Quantique de l'université de Hanovre, déjà impliqué officiellement dans le projet, pourrait se voir conférer un poids au moins comparable à celui du groupe de Garching.

Au total, même à supposer que le projet RFA-UK soit assuré d'une approbation rapide, le cadre général de sa réalisation paraît loin d'être aussi clairement défini que celui du projet américain LIGO. Les deux responsables scientifiques actuellement désignés, J.Hough de Glasgow et K.Danzmann de Garching, n'auront pas une tâche facile lorsqu'il leur faudra l'un et l'autre assurer les intérêts de leur groupe d'origine et coordonner en même temps les travaux qui se dérouleront principalement sur d'autres sites, au Rutherford et à Hanovre. Si un chef de projet est nommé, comme il est prévu, il lui faudra beaucoup de force et de doigté pour obtenir une contribution équilibrée de toutes les parties. L'une de difficultés, et peut-être pas des moindres, est que dans le cadre actuel, c'est la RFA qui est sensée apporter la plus grande part du financement et que c'est a-contrario le laboratoire UK du Rutherford qui est sensé fournir l'engineering.

**La politique, ou l'absence d'une politique européenne**

Ce que nous percevons en filigranne, au travers de ces contacts avec les groupes intéressés aux projets de détection d'ondes par interférométrie laser, c'est la difficile mutation entre l'échelle d'une recherche au sein de petites équipes vers celle d'une programmation ambitieuse d'un réseau d'antennes. Les chercheurs restent fortement attachés aux petites entités au sein desquelles ils ont su garder leur individualité sans préjudice évident sur les résultats; ils espèrent préserver cette structure au sein de fédérations au contour trop flou. L'enjeu revendiqué par tous se situe en fait à l'échelle d'une organisation dont, toute proportion gardée, le CERN pourrait constituer l'archétype. Ce nécessaire changement d'échelle a été, il me semble, correctement perçu par les responsables du projet LIGO.

La proposition par F.Kourilsky d'un débat pour la réalisation d'une antenne unique est à l'évidence mal reçue. Au lieu d'apparaître comme une initiative d'ouverture, elle oriente vers le triste abandon d'une ambition raisonnable de deux antennes européennes et bouscule dangereusement le processus engagé pour un projet RFA-UK. En tout état de cause, l'évolution vers un projet européen unique, qu'il soit à une ou deux antennes, ne pourra pas être réalisée sur la base d'une simple fédération de toutes les équipes, mais sur un projet d'ensemble établi après un large débat et dont la réalisation soit confiée à une organisation disposant d'une indépendance suffisante vis-à-vis de chacune des équipes initiales.

Dans l'immédiat, le choix au niveau européen est soit de tout remettre à plat immédiatement, avec la certitude de perdre au moins deux ans, soit de favoriser le processus en cours tout en mettant sur pied une structure de concertation ayant vocation à faire entrer ultérieurement les deux projets au sein d'une organisation européenne à définir.

Patrick Fleury





## Etudes par thèmes

Désignation et Titre	Date	pages
1. Physique et astrophysique. <i>Motivations Physiques et Astrophysiques</i> (B. Carter, J. Lequeux & R. Schaeffer)	20 Mars	4 p.
2. Relativité générale <i>La relativité générale face à l'expérience</i> ( J. Eisenstaedt):	20 Mars	5 p.
3. Sensibilité de VIRGO <i>VIRGO: la sensibilité de la métrologie laser</i> (Cl. Fabre)	6 Mars	4 p.
4. A propos du rapport sur la sensibilité de VIRGO. <i>VIRGO: la sensibilité de la métrologie laser</i> (discussion)	24 Mars	2 p.
5. Rapport du groupe de travail F. Dupont: <i>Rapport sur l'étude de l'organisation et du coût</i> (F. Dupont)	8 Février	14 p.

Pièce jointe:

diagramme "Pert" pour la réalisation de l'antenne VIRGO

## Motivations physiques et astronomiques

B.Carter, J.Lequeux & R.Schaeffer

La première question, avant toute étude de faisabilité (et évaluation des retombées technologiques) est celle de l'intérêt scientifique du projet VIRGO.

Il est un consensus évident dans la communauté scientifique que la détection d'ondes gravitationnelles aura un impact majeur, en tout premier lieu sur la physique de base et la compréhension des forces élémentaires régissant les lois de la nature. Dans un second temps, dans l'éventualité probable où la théorie d'Einstein de la gravitation est confirmée, la détection et l'analyse des ondes gravitationnelles d'origine extra-terrestre s'ajoutera à la panoplie des moyens d'investigation astronomique de l'Univers aux distances galactiques, extragalactiques voire cosmologiques.

Il y a peu de temps encore, notre connaissance directe de l'Univers observé était, si l'on peut dire, superficielle et basée sur la réception d'ondes électromagnétiques - et, plus indirectement, de rayons cosmiques - émis par les couches externes des corps célestes eux-mêmes opaques, ou encore par le gaz ténu du milieu interstellaire ou intergalactique. L'accès aux phénomènes à haute densité les plus énergétiques que l'astronomie connaisse ne nous a été permis que récemment par l'observation des neutrinos. Préparés par la réalisation des grands détecteurs de particules souterrains, les débuts de l'astronomie des neutrinos interstellaires datent de l'explosion de la supernova 1987A. L'astronomie des neutrinos - qui nous avait déjà réservé des surprises sur les conditions régnant au centre du Soleil - nous a permis pour la première fois de vérifier que ces explosions étaient bien dues à l'effondrement d'une étoile et formaient un objet très dense comme une étoile à neutrons ou un trou noir. L'astronomie des ondes gravitationnelles partage avec l'astronomie des neutrinos l'extrême faiblesse des forces en jeu et donc la grande difficulté de la détection expérimentale qui, justement, va de pair avec la grande puissance d'investigation du cœur même des phénomènes les plus violents. Le rayonnement gravitationnel, une fois sa détection maîtrisée, aura l'avantage d'une plus grande universalité: il nécessite simplement une certaine asymétrie dans le mouvement des masses, alors que l'émission de neutrinos ne peut se faire que dans des conditions physiques spécifiques.

Le développement pour un coût comparable à celui des deux instruments de l'IRAM, ou à peine supérieur à celui d'un télescope de 4 mètres, de moyens nouveaux et puissants d'observation astronomique est une justification suffisante en soi. La réalisation d'une première étape, proposée dans le projet VIRGO qui aura pour mission de prouver que la détection d'ondes gravitationnelles est possible, semble un préliminaire indispensable, le résultat promis, modeste certes pour un coût tout aussi modeste, ouvrant la voie à un programme plus complet d'astronomie des ondes gravitationnelles au début du prochain siècle.

Avant de passer en revue les résultats astronomiques qu'il est raisonnablement possible de garantir pour un premier détecteur de la nouvelle génération, il faut considérer qu'un projet aussi radicalement novateur pourrait être à l'origine de découvertes totalement imprévues. Toutes les branches de l'astronomie nouvellement ouvertes ont apporté leur moisson de phénomènes inattendus et spectaculaires. L'exemple le plus classique est la découverte par les premiers radiotélescopes du rayonnement extraordinairement intense venant d'objets totalement inconnus, les quasars, dont la vraie nature n'est toujours pas élucidée après trente ans de recherche.

La garantie la plus sérieuse que se produisent des événements détectables par un interféromètre comme VIRGO est la coalescence de deux étoiles à neutrons dans un système binaire. L'amplitude du signal et le spectre de l'émission peuvent être prédites - ce n'est pas le cas pour les autres sources possibles - avec une grande précision et un fort degré de confiance. Il est relativement facile d'extraire le signal du bruit de l'antenne. L'émission se fait principalement dans la bande de  $10^2$  à  $10^3$  Hz, domaine optimal pour le détecteur proposé. Un tel événement devrait être observable jusqu'à des distances de l'ordre de 100 Mpc, bien au-delà des 10 Mpc de l'amas de la Vierge dont nous faisons partie et qui a inspiré le nom du projet. Il reste une incertitude sur la fréquence de ces événements. Les étoiles à neutrons ne sont visibles que dans leur prime jeunesse et la plupart échappent à l'observation. Les binaires susceptibles de coalescence ne peuvent être comptées directement. L'estimation la plus sérieuse s'obtient à partir du taux de naissance, connu, des étoiles à neutrons en supposant que la proportion observée de binaires parmi les étoiles jeunes est la même parmi les étoiles plus anciennes, et donc invisibles. Nous avons pu vérifier que, dans l'état actuel de nos connaissances, une fréquence de quelques événements par an était parfaitement plausible.

A un degré de certitude moindre - mais c'est précisément pour cela que l'observation ou non d'un signal gravitationnel sera intéressante - la formation d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir dans une supernova devrait être détectable par VIRGO. Il n'y a guère plus d'une ou deux supernovae galactiques de ce type par siècle, il faut donc pouvoir les observer dans un rayon de 10 Mpc, à l'échelle de l'amas de la Vierge, pour espérer avoir quelques événements par an. L'intensité et la forme d'une onde gravitationnelle émise dans une telle éventualité sont très incertaines. Elles dépendent fortement de l'état initial, mal connu, du système. L'émission est conditionnée par une asymétrie de l'effondrement dont l'existence est vraisemblable, mais l'amplitude inconnue. Nous savons seulement que ce signal est nettement plus faible dans le cas, probable, de la formation d'une étoile à neutrons que dans le cas, plus rare, de celle d'un trou noir. Si la fréquence d'émission est aux alentours de  $10^3$  Hz (optimale pour le détecteur du projet VIRGO) une fraction de masse convertie en énergie de l'ordre de  $10^{-5}$ , ce qui n'est pas improbable, suffirait pour assurer une détection

---

\* La coalescence de deux étoiles à neutrons pourrait s'accompagner d'un sursaut de rayonnement  $\gamma$  - observable éventuellement par coïncidences entre plusieurs satellites - apportant en outre une information de première importance sur la direction d'arrivée du phénomène. L'éventualité de ce sursaut, cependant, n'est pas certaine, et la détection du rayonnement  $\gamma$  ne peut se substituer à l'observation de coïncidences entre plusieurs antennes gravitationnelles.

positive. Si par contre la fréquence est plus proche de  $10^4$  Hz comme le laissent entrevoir, toutes incertaines qu'elles soient, les estimations théoriques, une détection ne sera possible que pour un taux de conversion supérieur à  $10^{-3}$ . La prévision d'une rotation rapide pour une étoile à neutrons en formation laisse cependant entrevoir la possibilité de déformation voire de fragmentation et donc d'un taux élevé. Sur une plus longue période, des signaux d'une ampleur exceptionnelle dus à des évènements proches ne sont de toute évidence pas à exclure. Il est patent que VIRGO aurait observé un signal très clair provenant de la supernova 1987A s'il avait été opérationnel à l'époque.

En résumé, VIRGO devrait pouvoir détecter la première onde gravitationnelle. Il devrait apporter à la physique fondamentale la confirmation de l'existence de ces ondes et de leur génération par des objets denses lors de phénomènes violents comme la coalescence d'un système binaire. VIRGO a une certaine chance de détecter la formation d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir, ce qui serait d'un intérêt astrophysique bien plus grand vu notre ignorance dans ce domaine. VIRGO pourrait déjà découvrir des phénomènes exotiques et totalement inattendus, mais devrait surtout ouvrir la voie au développement en l'an 2000 de l'astronomie des ondes gravitationnelles.

Du point de vue des motivations scientifiques, le projet VIRGO doit être soutenu sans réserve aucune.

---

## La relativité générale face à l'expérience

**J. Eisenstaedt**

Laboratoire de Physique Théorique,  
Institut Henri Poincaré

Le projet VIRGO s'inscrit dans l'histoire des difficiles rapports que la relativité générale entretient depuis son élaboration avec l'expérience. Ce programme expérimental implique un concept essentiel de la théorie, les ondes de gravitation, et a donc pour enjeu de mieux comprendre la nature profonde, encore mystérieuse, de la gravité.

L'histoire de la relativité générale a été dominée par des difficultés d'ordres très divers : difficultés quant à l'élaboration de la théorie entre 1907 et 1915, quant à sa compréhension profonde, quant aux concepts et aux techniques relativistes, quant aux relations avec le champ expérimental et observationnel, quant à l'emprise réelle sur son propre champ que lui dispute de fait la théorie de la gravitation de Newton, quant aux méprises diverses sur le plan de son interprétation, quant aux problèmes que soulève son acceptation et sa réception par le monde scientifique.

Après sa naissance en novembre 1915, la relativité générale connaîtra une période relativement faste qui s'étendra grosso-modo jusqu'au début des années vingt. Le premier test sur lequel Einstein peut s'appuyer, c'est l'avance séculaire, restée jusqu'alors inexplicquée de 43" du périhélie de Mercure. Comme on le sait, deux autres prédictions sont déjà faites (qualitativement par Einstein dès 1907) : la déviation des rayons lumineux dans un champ de gravitation et le décalage des fréquences d'un atome situé dans un champ de gravitation. Lors de l'éclipse du 29 Mai 1919, les expéditions anglaise de Principe et de Sobral menées par S. Eddington et Frank W. Dyson, permettront la "vérification" de la prévision de la déviation de la lumière au bord du soleil. Bientôt, un consensus -de courte durée- atteindra aussi la vérification de l'effet de décalage des raies d'un spectre dans un champ de gravitation. A ce propos il faut signaler l'activité -tout à fait remarquable- des spectroscopistes français concernant la mesure du décalage gravitationnel des raies d'un atome sur le soleil ; au tout début des années 20, Henri Buisson, Charles Fabry, Alfred Perot, travaillent sur les raies d'émission du soleil, qu'ils comparent à des raies d'émission terrestres.

Entre 1925 et 1955, l'intérêt pour la théorie de la gravitation d'Einstein sera plus que mesuré dans la communauté internationale dominée par la dynamique et les résultats remarquables des théories quantiques, résultats face auxquels les quelques secondes d'arcs apportés -ici ou là- par la relativité générale sont de peu de poids. Les relativistes sont alors peu nombreux et très isolés. Le nombre de publications, dominées par des travaux souvent formels, accuse une baisse très sensible. En fait, la théorie de la gravitation newtonienne suffit à rendre compte de l'essentiel de la physique de la gravitation. A laquelle on ajoute, sans toujours bien comprendre ce que cela signifie, les effets relativistes indispensables pour rendre compte très précisément des quelques "anomalies" de la théorie Newtonienne. Domine bientôt très généralement la littérature spécialisée et pour près de cinquante ans, une interprétation "néo-newtonienne" de la théorie de la relativité générale. D'une part, on se limite dans les calculs -lorsque l'on tient compte des effets relativistes- à l'approximation post-newtonienne mais d'autre part est mise de fait sur pieds dans la littérature technique de la théorie une interprétation dont les concepts et les analyses sont essentiellement empruntés à la théorie de Newton. Inutile de dire que telle n'est pas la meilleure manière de progresser dans la compréhension de la théorie ...

Il faudra attendre les années soixante pour voir le renouveau de la théorie de la gravitation d'Einstein. Les relativistes s'attachent alors à repenser l'interprétation de leur théorie, en particulier à partir du concept de trou noir, mais aussi grâce à la cosmologie qui depuis les années trente a été un des rares sinon le seul lieu où a pu être pensée la relativité générale. Mais le renouveau relativiste s'attachera sans doute d'abord à développer les contacts avec l'observation et l'expérience. Ainsi, c'est de 1960 que date l'expérience de Pound et Repka qui a permis -grâce à l'effet Mossbauer- la première vérification précise de la prévision relativiste du décalage des raies d'émission d'un atome dans le champ de gravitation terrestre. Mais le renouveau de la relativité générale s'appuyait aussi bientôt sur les nouveaux objets de l'astrophysique : quasars, pulsars tandis que l'astrophysique s'appropriait les nouveaux objets construits par les relativistes, les trous noirs. Aussi bien, dès le début des années soixante, la détection des ondes gravitationnelles était envisagée et plusieurs tentatives furent réalisées en particulier par Jo Weber aux Etats-Unis. Depuis, les contacts de la théorie de la gravitation d'Einstein avec l'observation se sont multipliés ; il faut citer à ce propos la découverte de PSR 1913+16, le fameux pulsar binaire qui met en jeu d'énormes effets réellement relativistes et non plus de simples corrections "néo-newtoniennes".

Mais la question de la détection des ondes de gravitation va bien au-delà d'une simple vérification de la relativité générale car le problème de leur existence -que d'ailleurs personne ne questionne- implique toutes les théories de gravitation -et *a fortiori* unifiées- connues ou à venir. C'est dire combien il est nécessaire de tenter -et bientôt de réussir- à détecter des ondes gravitationnelles.

**VIRGO :**  
**la sensibilité de la métrologie laser**

**Claude FABRE**

Lab. de Spectroscopie Hertzienne, ENS Paris 6.

---

Rapport présenté au Comité d'évaluation le 6 Mars 1990

---

Mon propos ne peut prétendre couvrir tous les aspects relatifs à la sensibilité du projet VIRGO; le présent rapport est focalisé sur l'évaluation des bruits optiques, analysés en terme de l'objectif de  $3 \cdot 10^{-23} / \sqrt{\text{Hz}}$ .

### **I. Critiques**

- 1) Dans un état cohérent, on a  $\Delta\phi = 1 / 2\sqrt{n}$  et non  $\Delta\phi = 1 / \sqrt{n}$ ; le "shot noise" de phase est donc deux fois plus petit qu'indiqué dans le rapport VIRGO, ce qui est donc favorable.
- 2) Des facteurs numériques proches de 1 sont à changer dans certaines expressions, également dans le sens favorable. Cela ne change rien à la discussion qui suit, et les conclusions du rapport VIRGO restent valables.
- 3) Les différentes sources de bruit sont considérées comme poissoniennes à la limite, sans tenir compte de la cavité de recyclage. Or les fluctuations des champs dans l'espace libre et dans une cavité sont très différentes, à cause du filtrage par les cavités - les cavités Fabry-Perot et celle du recyclage - des fluctuations extérieures (celles du vide et celles du champ incident). Ce filtrage est relativement efficace car le trajet total des photons dans l'interféromètre (F-P + recyclage) vaut  $2 \times 40 \times 50 \times 3 \text{ km} = 12000 \text{ km}$ , soit un temps moyen de  $1 / 25 \text{ sec}$  !

## II. Esquisse d'un calcul global des bruits d'optiques

Calcul simplifié pour le cas idéal:

- résonnant au voisinage de l'extinction (phases égales dans les deux bras)
- pas de pertes
- système équilibré

$$\delta\mathcal{E}_{out}(\omega) = e^{i \frac{4 L \omega}{c \gamma_0}} \left[ \delta\mathcal{E}_v(\omega) + \left( \frac{i t}{\gamma + i \omega \tau} \right) \left( \frac{2}{\gamma_0} \right) \left( \frac{4 \pi L h}{\lambda} \right) \delta\mathcal{E}_{laser}(\omega) \right]$$

fluctuation du vide (entrant par la lame) Le "squeezing" peut intervenir ici.	Cavité de <u>recyclage</u>	Fabry- Perot	Déséquilibre de phase entre les deux bras, dû à <u>l'onde gravitationnelle</u>	Fluctuations du <u>laser</u>
----------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------	-----------------	--------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------

avec:

$h = c^{te}$  de Planck,  $\lambda =$  long. d'onde du laser,  $\gamma = [1 - \text{réflectivité}]$  et  $\tau =$  long.effective des bras :

$$\tau = \frac{2 l}{c} + \frac{4 L}{c \gamma_0}$$

- $\delta\mathcal{E}_v(\omega)$  : fluctuations du vide avec un simple facteur de propagation,
- $\delta\mathcal{E}_{laser}(\omega)$  : fluctuations du laser avec filtrage qui ne se manifestent qu'en cas de déséquilibre, pour  $\omega > \omega_{coupure} \approx 10$  Hz.

Vu de la sortie, même si le laser a un excès de bruit, c'est le bruit du vide (ou d'un état cohérent) qui compte.

Si le deuxième terme est négligeable, on retrouve le bruit donné dans le rapport VIRGO (a un facteur  $\approx 1$  près).

D'où:

- 1) Les résultats donnés dans le rapport VIRGO sont corrects, à des facteurs  $\approx 1$  près.
- 2) Les bruits du laser ont moins d'influence qu'indiqué dans le rapport VIRGO.
- 3) Il serait intéressant de poursuivre ce type de calculs pour une situation plus réaliste.

On retrouve en principe les mêmes effets de filtrage des fluctuations pour les problèmes de pression de radiation; la formule donnée est valable aux fréquences faibles. Ce ne serait pas le cas au-dessus de la fréquence de coupure de la cavité, soit  $3 \times 10^8 / 40 \times 6 \times 10^3 \approx 125$  kHz, mais ceci n'a pas d'importance dans le contexte VIRGO puisque seules les basses fréquences comptent.



### III. Table des bruits

En se référant à la numérotation du rapport VIRGO,

[2.14.1]

Avec l'expression ci-dessus, on a pour le niveau de sensibilité en amplitude

$$h = \frac{\lambda}{2 \pi L} \left( \frac{2F}{\pi} \right)^{-1} \frac{1}{4 \sqrt{N_{\text{recycl}}}} = \frac{\lambda}{16 L F} \sqrt{\frac{h \nu}{W}}$$

avec  $F$  = finesse du Fabry-Perot

$h_{\text{min}} \approx 1.9 \cdot 10^{-23}$  d'après rapport VIRGO,

$h_{\text{min}} \approx 0.7 \cdot 10^{-23}$  d'après cette expression.

[2.14.2]

L'expression [2.14.2] est différente de la condition [2.7.11] du rapport. S'il n'y a pas de déséquilibre, le bruit de fréquence du laser ne se manifeste que pour  $h \neq 0$ . Il se superpose alors au signal un bruit proportionnel. Ce terme n'apparaît comme bruit propre que s'il y a un biais permanent, induit par un déséquilibre. Pour un déséquilibre (optimiste ?) de  $10^{-3}$ , on doit avoir

$$\Delta \nu < 6 \times 10^{-5} \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$$

[2.14.3]

On aborde un nouveau point par rapport à [2.6] : l'effet de la pression de radiation différente dans les deux bras. Avec asymétrie de  $\approx 1\%$  dans le "build-up", on trouve  $\Delta \omega : \omega < 0.5 \cdot 10^{-11} / \sqrt{\text{Hz}}$ , mais plus loin (p.103), à cause du contraste différent de 100%, on a une autre limite de  $3 \cdot 10^{-10} / \sqrt{\text{Hz}}$ . Ici aussi il faut remarquer qu'il y a un filtrage par la cavité de recyclage.

En résumé,

- Les chiffres donnés dans le rapport VIRGO pour les bruits sont conservatifs.
- Il reste un certain nombre d'incertitudes dues au grand nombre de paramètres qui interviennent (pertes, transmissions, coefficient de mode matchnig ...). D'où nécessité de continuer les calculs de bruits, et d'y inclure ceux provenant de la détection par modulation, pour estimer de manière plus précise quels sont les paramètres vraiment importants.
- Les Fig.2.15 ne font pas entrer en ligne de compte le bruit lié au déséquilibre des deux bras.

### IV. Système optique

#### Miroirs

Les problèmes technologiques relatifs aux miroirs ne sont pas négligeables:

- précision de courbure et égalité des 2 rayons de courbure,
- inhomogénéités du substrat,
- tenue à la puissance: déformations, dommages optiques ( $P = 40 \text{ kW}$ , mais les faisceaux sont de grande taille),
- ces miroirs sont à la limite de la technologie actuelle, d'où temps de fabrication peut-être plus long que prévu.

Sources lumineuses

- beaucoup de boucles d'asservissement doivent fonctionner en même temps (mais A.Brillet et C.Man sont des experts).
- le laser YAG pompé par diode est certainement un bon choix, en raison de son excellent rendement (coût de fonctionnement réduit, problèmes techniques minimisés). Un YAG pompé par flash a en revanche les plus grandes difficultés à fonctionner en régime monomode ultrastable à très forte puissance.

Le laser envisagé est légèrement au-delà de la technologie 1990, mais le domaine évolue vite.

Détecteurs

Il est difficile actuellement de faire des InGaAs à la fois de grande taille et de très bon rendement quantique (mais le signal varie peu avec ce paramètre).

Stabilisation laser

Conditions peut-être moins contraignantes qu'indiqué (filtrage):

1) en fréquence  $\Delta \nu / \nu < 6 \cdot 10^{-5} \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ ; cela semble difficile vu les performances actuelles  $10^{-2} \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ , mais les conditions de fonctionnement du nouveau laser sont très différentes.

- Q énorme de la cavité, intensité importante, ce qui améliorera les performances ultimes des asservissements.

- Mais il y aura aussi des problèmes thermiques et des dommages.

2) en intensité Pour le niveau visé  $\Delta P / P < 10^{-9} / \sqrt{\text{Hz}}$ , le problème essentiel est le bruit à basse fréquence (le pompage du YAG par diodes sera favorable). Aux hautes fréquences, il ne devrait pas y avoir de difficulté: le "shot noise" sera atteint (et filtrage).

Au total, il y a beaucoup de travail à faire sur les asservissements en fréquence et en intensité, et sur les miroirs. Une partie peut être fait en labo; mais l'essentiel ne peut être fait que sur le montage en vraie grandeur (miroirs, filtrage de la cavité de recyclage)

**Conclusions**

- Le projet est bien cerné; les problèmes sont bien passés en revue.
- Le résultat de  $3 \cdot 10^{-23} / \sqrt{\text{Hz}}$  n'est pas assuré; mais on ne peut le savoir que si on réalise l'expérience en vraie grandeur.
- les études sur le bruit de l'interféromètre global sont à détailler.
- L'important n'est pas  $3 \cdot 10^{-23} / \sqrt{\text{Hz}}$ , mais de faire nettement mieux que les antennes actuelles. Les chiffres sur les fréquences d'évènements à amplitude  $h$  donnée s'appuient sur les connaissances actuelles...
- VIRGO est un instrument d'optique fascinant en lui-même: c'est un système avec une valeur de Q extraordinaire; permettant de stabiliser un laser de manière inégalée (l'auteur espère qu'il sera possible d'y avoir accès pour des études métrologiques ou d'optiques quantiques).

## VIRGO: sensibilité de la métrologie laser

### Discussion à propos du rapport de Cl.Fabre

*A la suggestion de Christian Bordé, un rapport a été demandé à Claude Fabre, du laboratoire de Spectroscopie Hertzienne (ENS Paris 6), sur les évaluations des sensibilités en métrologie laser. Ce rapport a été présenté lors de la réunion de 6 Mars.*

Nous joignons aux comptes-rendus le texte du rapport de Cl.Fabre. Nous nous en tiendrons donc ici à quelques remarques générales.

#### I. Le projet VIRGO est crédible

Le comité d'évaluation a été particulièrement attentif à l'opinion exprimée par Cl.Fabre selon laquelle le projet lui était apparu très crédible et que les chiffres cités par le rapport VIRGO pour la métrologie laser sont pour l'essentiel corrects.

Or, de l'avis de Cl.Fabre - avis partagé par les membres du comité pouvant se revendiquer d'une compétence en optique (A.A & Ch.B.) - une bonne instrumentation d'optique peut normalement atteindre le niveau de sensibilité correspondant au calcul théorique. Dans le contexte de VIRGO, selon Cl.Fabre, il faut relativiser un peu cet apriori, du fait que l'appareil explorera des situations extrêmes, susceptibles d'ailleurs d'intéresser très vivement les spécialistes d'optique.

Au-delà des travaux déjà réalisés, il n'y a guère d'autres points qui puissent faire l'objet de tests préalables; la seule façon de progresser consiste donc à passer aux dimensions de la grande antenne.

#### II. Quelques remarques ponctuelles

Passant en revue les divers éléments du calcul des sensibilités, Cl.Fabre note quelques erreurs de coefficients, et quelques oublis, qui ne modifient pas les conclusions d'ensemble. En fait, après corrections, les évaluations deviennent même *un peu plus optimistes que celles du rapport VIRGO*.

Principalement, Cl.Fabre prend en compte l'effet de filtrage par la cavité de recyclage, effet qui agit sur les bruits du laser. Les ondes de gravitation se manifesteront par une déformation de la cavité, ce qui équivaudra à un "bruit interne" qui, de ce fait, (heureusement!) ne sera pas filtré.

Par ailleurs, tout en approuvant les principaux choix faits par l'équipe du projet, Cl.Fabre note que le laser YAG est en effet prometteur, mais il est important de s'assurer du pompage par diodes et au lieu des flash (travail en cours). Il note aussi que les spécifications sur les miroirs sont à la limite de faisabilité.

### III. Vers un calcul complet de la métrologie

Sans qu'il y ait urgence - puisqu'aucune surprise majeure ne peut en résulter - Cl.Fabre considère qu'il faudra avoir réalisé, avant le début des tests de l'antenne, un calcul complet de la métrologie quantique (alors que les calculs actuels traitent séparément, de manière crédible, les éléments principaux du système). L'utilité de tels calculs sera de permettre une analyse plus efficace des tests et de progresser ainsi plus rapidement vers une compréhension globale du dispositif.

### IV. VIRGO: un instrument d'optique hors classe

Outre les retombées technologiques prévisibles (ex.: les miroirs), voire même déjà engagées (ex.: les asservissements des lasers YAG), le dispositif VIRGO constituera un instrument d'optique hors classe, donc susceptible d'un intérêt majeur pour l'optique quantique.

Cet état des choses doit normalement entraîner la participation active d'équipes engagées dans ce type de recherche. Un premier travail en commun \* pourrait être précisément la réalisation du calcul complet du système, envisagé dans sa totalité.

---

\*  
A la suite de ce rapport d'expertise, des premières discussions entre Cl.Fabre et le groupe d'Orsay, pour ce travail en commun, ont eu lieu.

**Etude  
de l'Organisation et du Coût  
du Projet VIRGO**

**Fr. Dupont**

LAL-Orsay



**Etude  
de l'Organisation et du Coût  
du Projet VIRGO**

**Fr. Dupont**

LAL-Orsay

**1) Introduction**

Cette étude a été conduite en utilisant une méthode générale de découpage en tâches des projets afin de pouvoir apprécier la structure et le coût du projet à travers un chiffrage tâche après tâche des ressources nécessaires, c'est-à-dire le personnel, la durée, les locaux, le coût.

L'avantage d'une telle étude est d'être exhaustive pour autant que le projet soit bien défini, ce qui est le cas du projet VIRGO. Il est cependant évident que ce n'est pas en quelques dizaines d'heures de travail sur ce sujet que l'on peut être certain de n'avoir rien oublié. Cependant ce projet apparaît bien défini dans son proposal et dans les dossiers techniques particuliers (Laser, optique, vide, etc...) ce qui permet de réduire considérablement les risques d'oubli ou de mésestimation d'une rubrique.

**2) Personnes rencontrées.**

Je ne cite ci-dessous que les personnes qui ont apporté les informations nécessaires à l'établissement de ce rapport :

- MM. Brillet, Marraud, Mme Man du GROG Orsay
- M. Giazotto de l'INFN Pise

Les réunions avec ces personnes ont été le 18.12.89 et 3.01.90 avec le GROG Orsay et le 13.01.90 avec Pise.

ablication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras Est (N.3) (coût centre-Est) + pompes, lances, N. 9/9/91 21

### 3) *Découpage en tâches et ressources*

Le découpage en tâches a été établi à partir du proposal et des discussions rappelées ci-dessus. Le but principal de ce découpage en tâches est d'établir qu'aucune opération n'est oubliée. A chaque macrotâche on rappelle les ressources nécessaires. Pour ce qui concerne le personnel, les nombres de personnes requises sont celles ressortant de la discussion avec le GROG Orsay et Pise ; il en est de même pour les locaux ; en ce qui concerne les coûts, on donne simplement dans ce chapitre des indications générales, en particulier où l'on peut trouver les coûts dans le proposal. Une appréciation générale sur ces coûts est donnée dans le chapitre 5 de ce rapport.

Le personnel nécessaire au projet VIRGO, dont il est question ci-dessous est celui complètement affecté (études et réalisation des matériels). Il s'agit donc de personnes n'ayant pas d'autres activités, en particulier de recherche. Ces personnes sont dès lors ci-dessous désignées comme "ingénieurs".

#### Macrotâche 1 : OPTIQUE : conception et étude

*Tâche 1.1* : Conception générale de l'optique : géométrie des éléments, géométrie de l'ensemble, layout général, etc ... Cette tâche est déjà réalisée à 100 %.

*Tâche 1.2* : Géométrie du faisceau : tâche réalisée à 100 %.

*Tâche 1.3* : Etude et conception des miroirs ; cela comprend 2 parties : d'une part la "mécanique" des miroirs (substrat, suspension, polissage, etc ...) et d'autre part le traitement de surface.

Un travail important de développement est encore à faire. Le contrat avec un industriel serait un contrat de fonction prenant en compte la mise au point totale des miroirs. Le coût élevé de ce poste (25 MF) dans l'évaluation figurant page 214 du proposal vient de cela. Ces 25 MF correspondent pour une large part à un coût d'équipement pour le fabricant. Ce point est un point technique important du projet, qui semble pouvoir être résolu dans l'industrie.

*Tâche 1.4* : Calcul fin de l'optique : effets des perturbations diverses, spécifications des composants. Cette tâche est déjà faite à 90 %.

*Tâche 1.5* : Etude de l'influence des effets mécaniques du faisceau de photon sur les miroirs : tâche déjà faite.

*Tâche 1.7* : Etude de l'interferomètre de Michelson (modulation, détection, etc ...). Cette étude est faite au niveau conceptuel.

*Tâche 1.8* : Etude de la lumière diffusée : tâche déjà faite et les solutions proposées sont suffisantes.

*Tâche 1.9* : Etude et essai en labo de l'ensemble injection et détection.

Cela comprend de l'optique, de l'électronique, de la spécification de composants optiques. L'étude conceptuelle est avancée ainsi que la réalisation en laboratoire. Cet ensemble réalisé en labo ne fera pas l'objet d'une réalisation industrielle et sera repris tel quel dans VIRGO.



- Ressources nécessaires à la macro tâche 1 :

\* Personnel (GROG Orsay uniquement)

1 ingénieur opticien plein temps pendant la durée de toutes ces tâches (égale à la durée du projet : 6 ans).

1 technicien de laboratoire plein temps pendant la durée de toutes ces tâches

1/3 "d'ingénieur" électronicien pendant la durée de toutes ces tâches, se partageant avec les macro tâches 2 et 3.

\* Locaux

Cette macro tâche 1 nécessite de nouveaux locaux, soit 150 m<sup>2</sup> de bureaux et 200 m<sup>2</sup> de salle grise en remplacement de ceux du CSNSM. Il faudra aussi monter un labo de vide.

\* Coût

Le coût de cette macro tâche est distribué sur les postes 4.2.1 (page 213) et 4.2.4 (page 214).

- Macro tâche 2 : Conception - étude du laser

*Tâche 2.1* : Etude et développement du laser de puissance.

Cette tâche concerne la mise au point d'un laser de technologie classique. Elle est réalisée à 30 %.

*Tâche 2.2* : Stabilisation en fréquence du Laser.

Cette tâche comporte de l'optique et de l'électronique. Les stabilisations atteintes jusqu'à maintenant sont suffisantes pour VIRGO ; mais le travail continue pour gagner encore 1 à 2 ordres de grandeur ce qui est intéressant pour une phase ultérieure de VIRGO. Cette tâche est menée par le GROG Orsay et non pas par MBB ou BMI.

*Tâche 2.3* : Stabilisation en puissance du Laser.

Cette tâche comprend encore de l'optique et de l'électronique. Il faut gagner un ordre de grandeur en améliorant les boucles d'asservissement. Ce n'est pas jugé comme difficile.

*Tâche 2.4* : Stabilisation de la géométrie du faisceau.

Le choix de la méthode est encore à faire parmi plusieurs qui sont étudiées. Cette tâche est à réaliser.

*Tâche 2.5* : Développement d'un laser pompé par diodes.

Cette tâche démarre seulement. Sa réussite n'est pas obligatoire pour le projet VIRGO qui peut se contenter du laser de la tâche 2.1.

Cette tâche est conduite en collaboration avec BMI (France) et MBB (RFA). Il s'agit là encore d'un contrat de fonction dont le coût est pris en charge en partie par les entreprises concernées et en partie par des organismes publics. Ce coût de développement n'est pas compté dans le coût VIRGO.

abrication et finis en pièce du tronçon de 750 m. Bras EST (N°3) (coût centre-Est) + domes, lances, ...

- Ressources nécessaires à la macro tâche 2

\* Personnel (Seul le GROG Orsay travaille sur cette macro tâche)

1 "ingénieur" laseriste à plein temps pendant la durée de toutes les tâches Laser (égale à la durée du projet : 6 ans)

1 technicien de laboratoire pendant 6 ans.

2/3 "ingénieur" électronicien pendant la durée de toutes ces tâches

\* Locaux : même remarque que pour la tâche 1

\* Coût : Le coût est là aussi réparti entre 4.2.1 et 4.2.4 du proposal.

- Macro tâche 3 : Etude et développement des détecteurs.

Cette macro tâche ne se décompose pas en tâches. Elle sera confiée (contrat de fonction) à un industriel chargé de développer la bonne technologie. Il s'agit donc là d'écrire le "cahier des charges de fonction" et de suivre les travaux de l'industriel.

- Ressources nécessaires à la macro tâche 3

\* Personnel :

L'ingénieur opticien cité ci-dessus devra établir le cahier des charges et suivre les travaux.

\* Locaux : même remarque que tâches 1 et 2

\* Coût : figure au 4.2.1 du proposal.

- Macro tâche 4 : Etudes mécaniques et électroniques

*Tâche 4.1* : Isolation sismique : étude définitive, tests des prototypes, spécifications des éléments et chaîne d'asservissement, dessins des systèmes.

Cette tâche est déjà réalisée à Pise et en est au stade des mesures sur des éléments prototypes réalisés.

*Tâche 4.2* : Système d'amortissement des oscillations et de blocage de position. Conception définitive, tests des prototypes. Spécification des éléments et chaîne d'asservissement. Dessin des systèmes.

Cette tâche nécessite encore le travail d'un projeteur pendant quelques mois, supervisé par un "ingénieur" mécanicien pendant 1 ou 2 ans (ou un thésard). Pas de technicien requis.

*Tâche 4.3* : Système d'alignement des miroirs, conception définitive, tests des prototypes. Cette tâche est encore à faire et nécessitera un ingénieur mécanicien pendant 1 an ? plus un projeteur quelques mois.

Les tâches 4.1), 4.2), 4.3) sont un point technique très important du projet, la réussite des tests est un milestone pour le projet.

*Tâche 4.4 : Etude du tube à vide*

Il s'agit là de l'étude mécanique prenant en compte les problèmes de vide ainsi que les procédés de réalisation. Cela comprend donc les calculs mécaniques et thermiques divers, les études et dessin des tubes, fonds, crevés, manchettes d'instrumentation, brides, supports, etc ... ainsi qu'une conception globale des outillages de réalisation, et des procédures de mise en propreté.

Le tube à vide doit lui aussi faire l'objet d'un contrat de fonction depuis l'étude jusqu'au montage. Cette tâche est donc sous-traitée a priori, mais un "ingénieur" mécanicien VIRGO reste bien entendu nécessaire ; en particulier pour écrire le cahier des charges de fonctions (cf tâche 8.5).

*Tâche 4.5 : Etude des chambres d'instrumentation.*

Il s'agit d'une étude similaire à la tâche 4.4, mais concernant les enceintes à vide abritant les isolateurs sismiques.

Cette tâche devrait être prise en charge par Pise et nécessitera donc un ingénieur pour la conception et les plans pendant 1 an environ.

*Tâche 4.6 : Etude du vide*

Cette tâche doit mener au choix des pompes, des vannes, des jauges, des brides et des joints à vide, du système d'étuvage et doit définir les paramètres généraux du contrôle-commande du vide, ainsi que l'étude de la stabilité du vide à très court terme (1 ms).

Cette étude est faite à 80 % et nécessite un "ingénieur" spécialiste du vide pendant encore 0,5

- Ressources nécessaires à la macrotâche 4

\* Personnel :

On voit apparaître dans ces tâches d'études :

1 "ingénieur" électronicien sur les tâches 4.2 et 4.3 que l'on retrouvera dans les tâches de spécification et de suivi de contrat. Il sera donc nécessaire pendant les 6 ans du projet.

4 "ingénieurs" mécaniciens se répartissant sur les tâches 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5 qui comme ci-dessus seront nécessaires pendant la durée totale du projet.

2 projeteurs mécaniciens en parallèle 6 mois sur les tâches 4.2, 4.3 et 4.5.

1 "ingénieur" vide sur la tâche 4.6 qui sera aussi nécessaire pendant la durée du projet.

1 technicien de laboratoire sur les tâches 4.1, 4.2, 4.3.

\* Locaux : pas de remarques particulières

\* Coût : figure dans le paragraphe 4.2.3 du proposal : compte tenu de l'aspect contrat de fonction ou non des tâches, ce coût est à voir poste par poste (cf. chap. 5 du rapport).

**- Macrotâche 5 : Etude du contrôle-commande de l'antenne***Tâche 5.1* : Etude de l'acquisition de l'état de l'antenne.

Il ne s'agit pas là de l'acquisition de données qui fait l'objet de la macrotâche 6. Il s'agit d'avoir en temps réel l'état de tous les capteurs importants de l'antenne, c'est-à-dire :

- états du vide : pompes in ou out, courants de pompage, niveau des jauges, état des vannes (ouvertes ou fermées), etc ...
- position des miroirs : état des systèmes d'asservissement (affichage de l'"erreur" pour autant que cela soit possible)
- états des divers autres capteurs ; exemple : température du tube en divers points, état des isolateurs sismiques, etc ...

Cette tâche requiert la présence d'un ingénieur pendant tout le projet pour définir avec les autres ingénieurs :

- les paramètres à acquérir
- le système de contrôle-commande à employer
- définir les scénarios de contrôle (par exemple : quelles actions entreprendre en cas de fuite de vide)

*Tâche 5.2* : Etude des interconnexions, du pupitre de la salle de contrôle

Il s'agit là, après la tâche 5.1, de réaliser les interconnexions résultant de l'étude, d'en dresser les plans ainsi que de la salle de contrôle et de préparer les achats de composants.

**Ressources nécessaires à la macrotâche 5****\* Personnel**

1 ingénieur pour la tâche 5.1 qui devra être présent pendant toute la durée du projet pour réaliser le contrôle-commande

1 technicien d'interconnexions pour la tâche 5.2 qui devra être aussi présent pendant la durée du projet

\* Locaux : la localisation de ces personnes est à terme sur le site même, mais ils doivent pouvoir consulter fréquemment le reste du groupe de projet.

\* Coût : le coût apparaît dans le paragraphe 4.2.4 où il est combiné avec l'acquisition de données. Il semble qu'il soit raisonnable de passer le coût total de ces 2 postes de 6 MF (estimation actuelle) à 9 MF H.T (études plus réalisation (tâche 9.7) pour prendre en compte les interconnexions qui sont amplifiées par la longueur totale des bras de l'antenne (6 km).

**Macrotâche 6 : Etude de l'acquisition de données**

Cette macrotâche concerne la prise des données qui intéressent les physiciens ; elle est définie assez globalement pour l'instant.

## Macrotâche 7 : Etude des sites et bâtiments

### Tâche 7.1 : Spécification du site

Cette tâche comprend tous les travaux menant au contrat d'acquisition du site, par exemple sondages, géodésie, contacts administratifs, etc ...

### Tâche 7.2 : Analyse des besoins en bâtiments

Il s'agit de bien répertorier la surface de chaque type de bâtiment nécessaire : halls de montage (surface, hauteur, propreté, moyens de manutention, ...), salle de contrôle-commande, bureaux, laboratoires de physique (surface, hauteur, propreté, moyens de manutention), locaux techniques (chaufferie, climatisation, labo de vide, labo de nettoyage de composants, etc ...)

### Tâche 7.3 : Analyse des besoins en "fluides"

Les fluides en question sont :

- l'électricité : distribution autour de l'antenne
- le chauffage et la climatisation ou ventilation
- l'eau : distribution de l'eau de ville, analyse du besoin (ou du non-besoin) d'eau traitée
- le téléphone et le réseau informatique autour de l'antenne.

### Tâche 7.4 : Spécification du tunnel

Il s'agit de définir d'abord l'espace nécessaire pour pouvoir passer le tube lui-même, intervenir autour (mise en place des coussins d'étuvage, détection de fuite, accès aux capteurs divers ...), mettre en place des chemins de câbles (puissance, signaux).

Il faut définir ensuite la stabilité à moyen terme que l'on attend pour le tunnel, en particulier au droit des manchettes d'instrumentation qui reprennent les efforts dus au vide et aux dilatations. Cette stabilité détermine les fondations et donc le coût.

Il faut enfin définir les besoins en ce qui concerne les murs qui doivent (?) supporter les chemins de câble.

Ces 3 dernières tâches sont les travaux de base qui doivent exister avant qu'un APS (avant-projet sommaire) puisse être établi par un engineering.

### Ressources nécessaires à la macrotâche 7 :

#### \* Personnel

1 "ingénieur" connaissant le métier du bâtiment mais aussi les impératifs des travaux de recherche, est nécessaire pour ces tâches qui peuvent durer entre 0,5 et 1 an et qui doivent débiter dès l'approbation du projet, cet ingénieur restera nécessaire ensuite pendant tout le projet. Il s'agit là bien entendu, d'un marché de fonction.

\* Locaux : l'ingénieur doit être basé non loin du site d'implantation de VIRGO.

\* Coût : Cette tâche rentre dans le chiffrage global du paragraphe 4.2.2.

**Macrotâche 8 : Ecriture des spécifications et lancement des contrats**

Les tâches précédentes ont montré que les matériels de VIRGO feront tous l'objet de contrats de fonction **sauf** :

- l'ensemble d'injection détection construit par le GROG d'Orsay

- l'ensemble cuve d'instrumentation et isolation sismique dont les plans existent où sont à terminer et qui devrait être construit sous forme de contrat d'exécution par Pise.

Cela explique que ces tâches de spécifications et lancement de contrat sont très importants dans le cas de VIRGO, qu'elles nécessitent des cahiers des charges bien écrits, des discussions sérieuses et approfondies avec les éventuels sous-traitants, enfin que la phase de lancement de contrat soit précédées si nécessaire d'une phase d'homologation de procédés sur des prototypes. Le temps total requis par une telle procédure peut atteindre l'année.

*Tâche 8.1* : Spécifications du laser et lancement du contrat : cette tâche est déjà contenue dans la tâche 2.1

*Tâche 8.2* : Spécification et achat des composants de l'ensemble injection-détection.

Cette tâche (cf 1.9) sera réalisée par le GROG Orsay dans les deux premiers tiers de la durée du projet.

*Tâche 8.3* : Spécification des cuves d'instrumentation, des isolateurs sismiques, des systèmes d'alignement, d'asservissement de position, etc ... et lancement des contrats.

Il s'agit là d'un nombre assez important de spécifications d'exécution. Cette tâche totale s'étalera sur 1 an ou 1,5 an entre la fin de l'étude (tâche 4) et le début du travail chez les sous-traitants. Cette tâche est réalisée par Pise.

*Tâche 8.4* : Spécification du Hardware de l'acquisition de données. Lancement du contrat. Pas de commentaires sur cette tâche.

*Tâche 8.5* : Spécification du tube à vide. Lancement du contrat.

Cette tâche, en ce qui concerne le personnel VIRGO, consiste à écrire le cahier des charges de fonctions permettant de lancer un contrat comprenant l'étude (tâche 4.4) et la réalisation donc les spécifications d'exécution intermédiaires (tâche 9.6).

L'ingénieur dont il est question à la tâche 4.4 est bien entendu, présent ici.

*Tâche 8.6* : Spécifications des éléments de pompage et lancement des approvisionnements des composants.

Suite de la tâche 4.6 ; nécessite la présence à temps partiel de l'ingénieur vide pendant le reste du projet pour le suivi, la réception, le test des composants.

*Tâche 8.7* : Spécifications du contrôle-commande et des interconnexions. Lancement du contrat.

Les personnes citées aux tâches 5 ont à écrire les spécifications permettant d'acheter le matériel nécessaire aux contrôle-commande de l'antenne -les capteurs sont achetés par les responsables des matériels- et de lancer un contrat pour tous les passages de câbles et connecteurs (interconnexions), puissance et signaux.

### *Tâche 8.8 : Choix d'un architecte et d'un bureau d'études pour les bâtiments*

Cette tâche concerne l'ingénieur des tâches 7 et consiste à ouvrir un concours d'architecture, à dépouiller les réponses au concours et à choisir architecte et bureau d'études. Ceci doit être fait avec l'aide d'un service constructeur (soit CNRS, soit INFN).

Ressources nécessaires à la macrotâche 8.

\* Personnel : Le personnel vu aux tâches précédentes est présent pour les tâches 8 pendant toute leur durée qui est de l'ordre de 0,5 à 1 an en moyenne.

\* Locaux : pas de commentaires ; mais on voit déjà apparaître la nécessité de personnel situé non loin du lieu d'implantation de VIRGO.

\* Coût : Le coût de ces tâches est surtout du coût de main d'oeuvre VIRGO.

### *Macrotâche 9 : Réalisation des équipements, suivi de réalisation, tests de réception*

#### *Tâche 9.1 : réalisation Laser*

Se reporter à la tâche 2.1. Contrat de fonction suivi par l'ingénieur laseriste de VIRGO plus un chercheur, un thésard.

#### *Tâche 9.2 : Réalisation de l'ensemble injection-détection et de l'optique.*

Cette réalisation est prévue par le GROG Orsay avec le personnel prévu à la tâche 1.9. En ce qui concerne les miroirs, il s'agit d'un contrat de fonction.

#### *Tâche 9.3 : Réalisation des cuves d'instrumentation et des isolateurs sismiques.*

Il s'agit là de contrat d'exécution nécessitant la présence de l'équivalent de 2 ingénieurs mécaniciens pendant la durée de la réalisation et de 2 techniciens pour montage et tests pendant les 2 dernières années.

#### *Tâche 9.4 : Réalisation de l'acquisition de données.*

Il s'agit d'interconnecter le Hardware et surtout d'écrire le software correspondant. 2 ingénieurs prévus pendant 4 ans.

#### *Tâche 9.5 : Réalisation tube à vide*

Le suivi de ce marché est fait par un ingénieur mécanicien assisté de l'ingénieur vide. Toute la main d'oeuvre nécessaire pour le montage, les tests, la réception est réputée fournie par le sous-traitant.

Dans le cas où les approvisionnements seraient faits par VIRGO, il faudrait un ingénieur de plus que la liste donnée ci-dessous.

#### *Tâche 9.6 : Approvisionnement et tests composants de vide.*

Suite de la tâche 8.6. Le montage de ces composants est fait par le sous-traitant de la tâche 9.5.

**Tâche 9.7 : Réalisation du contrôle-commande.**

Cette tâche comprend deux parties : d'une part l'écriture des logiciels nécessaires qui sera le fait de l'ingénieur des tâches 5 et 8.7 plus un programmeur pendant 3 ans environ.

D'autre part, les interconnexions seront réalisées par une entreprise extérieure suivie par le technicien des tâches 5 et 8.7.

**Tâche 9.8 : Réalisation des bâtiments**

Suite des tâches 7 et 8.8. Toute cette réalisation sera prise en charge par le cabinet d'architecte travaillant comme maître d'oeuvre. Cela consiste en APS puis APD puis permis de construire puis appel d'offre aux entreprises et pilotage de celles-ci. Tous ces travaux devront être suivis pour VIRGO (maître d'ouvrage) par l'ingénieur des tâches 7 et 8.8.

**Ressources nécessaires à la macrotâche 9**

\* Personnel : le plein du personnel VIRGO technique sera fait pendant cette phase qui durera entre 3 et 4 ans, il s'agit de :

- 1 ingénieur opticien (déjà employé sur macrotâche 1, tâches 3, 8.2, et ici 9.2).
- 2 ingénieurs électronicien (1 déjà employé sur tâches 1, 2, 4.2, 4.3, 8.3 et ici 9.3).
- 1 ingénieur laseriste (déjà employé sur les tâches 2, 8.1 et ici 9.1).
- 4 ingénieurs mécanicien (déjà employés sur les tâches 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 8.3, 8.5 et ici 9.2, 9.3, 9.5).
- 1 ingénieur vide (tâches 4.6, 8.6, et ici 9.6).
- 1 ingénieur contrôle-commande (tâches 5, 8.7 et ici 9.7).
- 1 ingénieur bâtiment (tâches 7, 8.8, 9.8).
- 2 techniciens laboratoire (tâches 1.2, 9.1, 9.2)
- 2 techniciens mécanicien (tâches 1, 2, 9.1, 9.2)
- 1 technicien interconnexion (tâche 5, 8.7 et 9.7).
- 1 programmeur contrôle-commande (tâche 9.7)
- 2 ingénieurs acquisition de données (tâche 6, 8.4, 9.4)

Un ingénieur mécanicien supplémentaire serait nécessaire dans le cas où les approvisionnements pour le tube à vide seraient faits par VIRGO.

Il est alors clair que cette équipe doit être conduite par un ingénieur chef de projet, ce qui conduit à avoir une équipe technique de 19 personnes pendant les 4 dernières années du projet.

\* Locaux : pendant cette phase du projet, il faut prévoir, au moins pendant les années 5 et 6, des locaux provisoires abritant une vingtaine de personnes sur le site de l'expérience.

\* Coût : contenus dans 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 du proposal.

**Macrotâche 10 : Montage**

Cette macrotâche est pour mémoire puisque la majeure partie des contrats prévoit le montage et que le personnel VIRGO suffit au montage des autres éléments.

**Macrotâche 11 : Support administratif du projet**

Ce projet, compte tenu de son ampleur devra disposer d'une personne dédiée à la gestion du projet, d'un acheteur technique et de 2 secrétaires.

Il faut cependant remarquer que cela n'est pas suffisant pour assurer toute la gestion de ce projet qui devra s'appuyer, pour les passations de contrat, pour la comptabilité, sur un laboratoire possédant l'infrastructure adéquate.



#### 4 - Structure du projet et personnel

Le découpage en tâches ci-dessus, et la pratique du projet dans son état actuel permettent de définir une structure consistant dans un découpage thématique du projet : Optique, Laser, Mécanique et Vide, Electronique, etc... Une partie du personnel existe pour certaines des tâches, il reste à recruter et à structurer le personnel pour les tâches mécaniques et vide, contrôle commande etc...

VIRGO a adopté le principe du choix d'un chef de projet unique pour la collaboration ; la direction de projet étant partagée par MM. Brillet et Giazotto.

Le nombre total de personnes dont le projet aura besoin s'établit à :

14 "ingénieurs" dont le chef de projet  
6 techniciens dont 1 programmeur et 1 acheteur  
3 administratifs

Sous réserve d'un inventaire plus précis, le groupe comprend l'équivalent de 6 ingénieurs et 2 techniciens. Le reste du personnel est à rassembler.

On répète que le personnel administratif prévu n'est pas suffisant pour assurer toute la gestion du projet et qu'il faudra donc l'appui d'un laboratoire.

#### 5 - Coût du projet

Le coût apparaissant dans la proposal est Hors Taxe. Le coût donné ci-dessous est aussi Hors Taxe.

On reprend le découpage des coûts du proposal :

##### 5.1) Etudes

Le coût n'a été analysé en détail, mais c'est une faible partie du coût total, il s'établit à :  
4,4 MFF HT environ.

##### 5.2) Infrastructures

Pour ce poste, le coût est grandement influencé par la longueur de l'antenne qui entraîne une surface hors-oeuvre importante.

##### - Acquisition du site 5 MFF HT

Pas de commentaires ; il semblerait que ce soit le prix auquel les propriétaires actuels du terrain soient prêts à vendre. Ce prix à l'air de correspondre à un prix correct de terrain agricole. A remarquer qu'il n'y a pas de prix de clôture, dont le seul coût sur 6 km pourrait s'établir à près de 1 MFF HT.

##### - Routes

Le coût de 1 MFF HT pour les routes semble très en dessous de la réalité, sauf si la route dont il s'agit est simplement un chemin très simplifié. Compte tenu des travaux nécessaires autour du tunnel pour assurer la réalisation du tube à vide ce poste routes devrait être multiplié par 3 pour être raisonnable soit 3 MFF HT.

- Tunnel : Coût total 18 MFF HT soit 3 000 FF HT/m

Ce coût paraît convenable dans le cas d'un tunnel très simple (pour un tunnel de 2,2 m de large cela fait 1 350 F HT/m<sup>2</sup> ce qui est un coût certainement minimum). Il ne faut pas que des objectifs de stabilité obligent à renforcer le radier ou à forer des pieux ce qui renchérirait

considérablement le coût total. De plus le coût des ponts nécessaires pour le système d'irrigation de la plaine doit être soigneusement estimé, bien qu'il apparaisse que ces coûts seront pris en charge par la commune concernée.

- Bâtiments

9 000 kFF HT pour 1 070 m<sup>2</sup> + 60 m<sup>2</sup> ? soit 1 130 m<sup>2</sup> total comprenant les bâtiments des chambres d'instrumentation, du contrôle commande et techniques (compresseurs, etc...) soit 8 000 FF HT/m<sup>2</sup>.

Ce prix au m<sup>2</sup> peut être comparé à celui de l'ESRF (30 500 m<sup>2</sup> de locaux "techniques") qui devrait être moins cher d'une part (effet d'échelle et halls immenses moins techniques) et plus cher d'autre part (plus de béton de blindage, etc...). Ce prix ESRF au m<sup>2</sup> peut donc être comparable ; il s'établit à 13 900 FF HT/m<sup>2</sup> comprenant les frais d'architecture, d'assurance, les terrassements, les bâtiments, les lots techniques, les parkings, la remise en état des abords.

L'évaluation du coût du bâtiment doit donc comporter deux phases :

- d'abord être certain des surfaces nécessaires (les 1 130 m<sup>2</sup> totaux semblent faibles)
- ensuite réestimer le coût au m<sup>2</sup> qui devrait s'approcher plus de 13 000 F HT/m<sup>2</sup> (au lieu de 13 900 F, le lot technique électricité étant partiellement pris en compte (transformateurs) par le poste suivant).

En gardant la même surface (1 130 m<sup>2</sup>) le coût total devient : 14,700 MFF HT au lieu de 9 000 MFF HT.

Enfin, il faut rajouter à ce coût une provision de 0,400 MFF HT pour des bâtiments provisoires loués.

Le coût total de ce poste passerait donc à 15 MFF HT pour ce poste à surface égale avec celle prévue.

- Electricité : cela comprend - à ce que l'on peut inférer - le poste de distribution ainsi que toute la distribution moyenne tension, y compris les transformateurs. Si cela comprenait aussi la distribution basse tension sur tout le site, alors il faudrait enlever 3,5 MF au total précédent.

Le coût des infrastructures (HT) s'établirait alors à :

Acquisition	6	MFF HT (clonure en plus)
Routes	3	MFF HT
Tunnel	18	MFF HT
Bâtiments	15	MFF HT
Electricité	9	MFF HT

---

Total                      51      MFF HT

au lieu de 42 MFF HT dans le proposal.

## 5.3) Vide

Le coût total du système à vide comprenant le tube de 6 km et le montage du tube s'établit à 60 MF HT d'après le proposal y compris les coûts d'approvisionnement de matière première (entre 25 et 30 F/kg, 700 tonnes). Une demande d'offre faite à partir de spécifications précises auprès d'industriel établit ce total à 110 MF HT, ce qui correspond à un chiffre qui semble plus raisonnable, à partir d'une simple évaluation du prix au kg de matière ouvrée.

Cela fait un coefficient de correction de 1,83 qui ne s'applique pas aux pompes à vide (prix connu).

Si on applique ce coefficient de 1,83 aux chambres d'instrumentation et aux atténuateurs, on trouve 8,6 MFF HT au lieu de 4,7 MFF HT ; il faut bien réaliser que chaque atténuateur (il y en a 6 au total) comporte 7 pendules avec amortisseur à gaz et un nombre d'asservissement (bobines + mécanique) important.

Ce coût de 8,6 MFF comprend au moins 3 MFF pour les chambres elles-mêmes. Il reste donc 5,6 MFF pour l'ensemble de 42 éléments d'isolation et leurs asservissements y compris les alimentations et circuits électroniques. Ce chiffre semble raisonnable.

Le coût total de ce poste (HT) s'établirait alors à :

Tube et montage	110	MFF HT
Chambres d'instrumentation et atténuateurs	8,6	MFF HT
Pompes	12,5	MFF HT
Vannes	3,3	MFF HT
	<hr/>	
Total	134,4	MFF HT

## 5.4) Interferomètre

Ce poste est dominé par les miroirs (25 MFF) pour lequel le chiffre annoncé résulte d'une offre par l'industrie. Ce chiffre est donc crédible.

Nous n'avons pas étudié en détail les deux rubriques suivantes dont l'établissement du coût ne peut être que le fait de spécialistes.

Par contre la dernière rubrique : contrôle-commande et acquisition de données a été augmentée de 50 % pour tenir compte des coûts de contrôle-commande qui n'ont pas été suffisamment vus dans le proposal.

Le coût total de ce poste (HT) s'établit alors à :

Miroirs	25	MFF HT
Optique	8	MFF HT
Laser	3	MFF HT
Contrôle-commande at acquisition de données	9	MFF HT
	<hr/>	
Total	45	MFF HT

### 5.5) Total du coût VIRGO

#### 5.5.1) Coût de l'équipement (capital cost)

On reprend ci-dessous les nouvelles estimations HT suivies de quelques commentaires :

1) Etudes	4,4	MFF HT
2) Infrastructures	51	MFF HT
3) Vide	134,4	MFF HT
4) Interferomètre	45	MFF HT
	<hr/>	
Sub-total	234,8	MFF HT
Aléas (10 %)	23,5	MFF HT
	<hr/>	
Total	258,3	MFF HT (capital cost)

#### 5.5.2) Coût du personnel

L'établissement du coût en personnel dédié au projet (les 23 personnes ci-dessus) dépend essentiellement du coût horaire adopté, c'est-à-dire des charges dont on grève ce coût horaire. Ces charges (hors charges sociales) dépendent essentiellement du cadre statutaire de la collaboration. L'évaluation ci-dessous est donc moyenne en estimant un coût horaire moyen de 300 F/h pour les 23 personnes pendant 6 ans soit 74 MFF HT pour l'ensemble du projet.

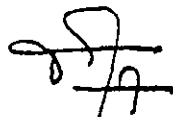
#### Commentaires :

- Le coût des infrastructures est ici de 20 % du coût final de l'instrument, ce qui est la limite basse dans ce type de projet scientifique où la part bâtiment oscille en général entre 20 % et 30 % du coût total des investissements. Pour rester dans cette limite de 20 %, il faut s'en tenir aux surfaces prévues et chercher à simplifier au maximum le tunnel.

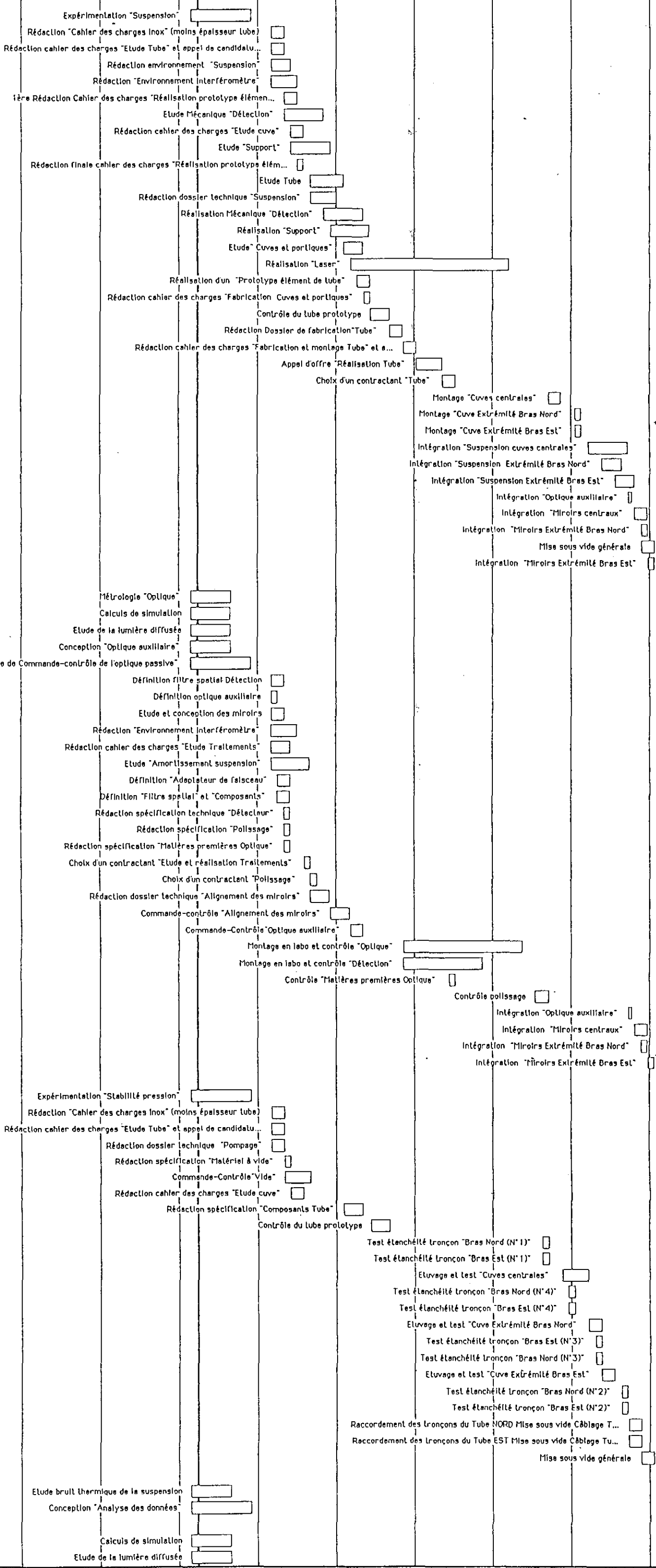
- Les marchés de fonction sont prévus sans phase initiale de développement de prototypes qui peuvent amener à des dépenses non négligeables. Ce coût peut passer dans les aléas.

### 6 - Analyse du délai prévu

Le groupe VIRGO donne aujourd'hui un délai total de réalisation de 6 ans à partir de la mise en place des crédits. Un PERT basé sur le découpage en tâche précédent devrait permettre d'affiner cette prévision qui semble raisonnable pour la fabrication du tube à vide lui-même et des miroirs.



F. DUPONT



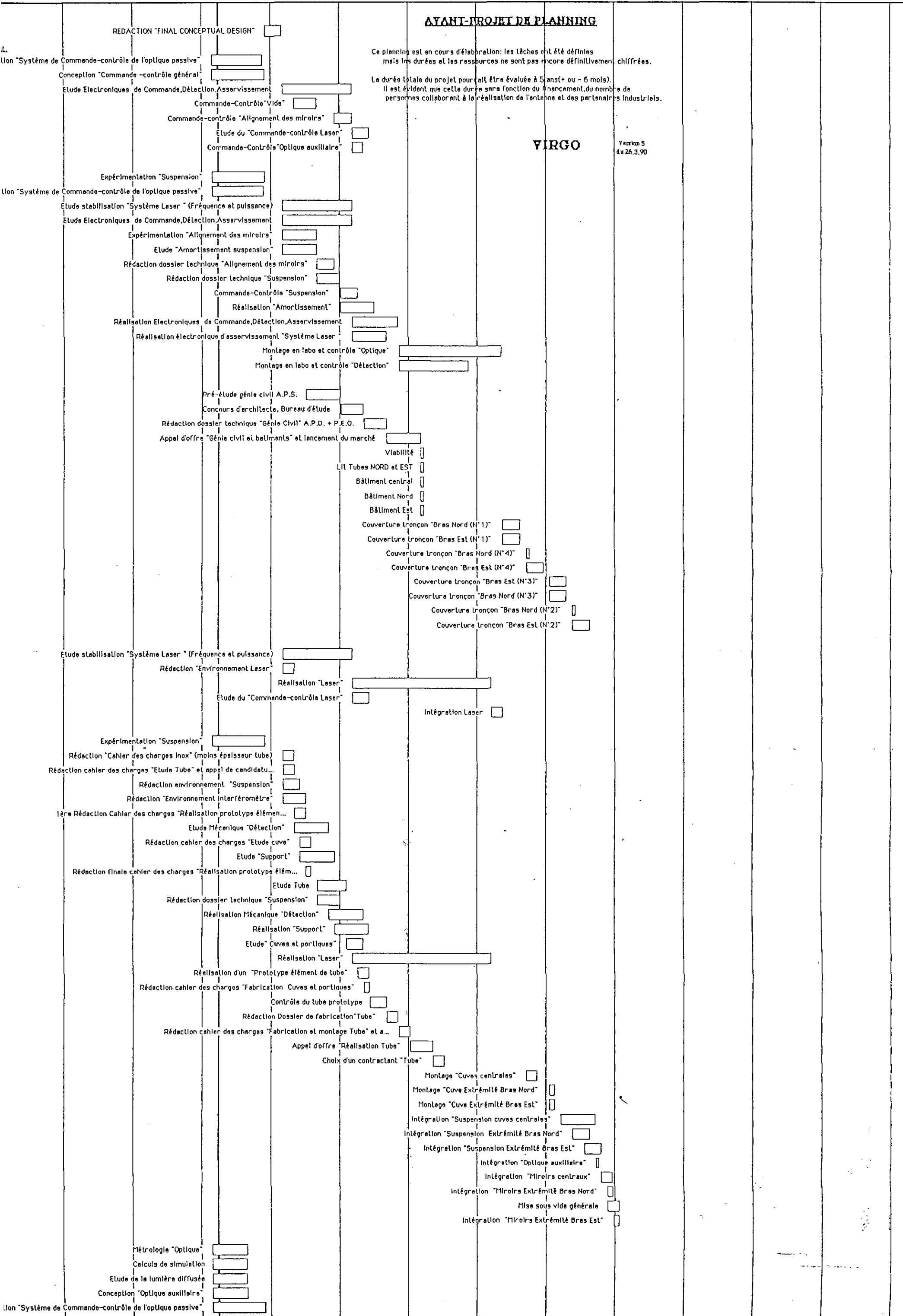
**AVANT-PROJET DE PLANNING**

Ce planning est en cours d'élaboration: les tâches ont été définies mais les durées et les ressources ne sont pas encore définitivement chiffrées.

La durée totale du projet pourrait être évaluée à 5 ans (+ ou - 6 mois). Il est évident que cette durée sera fonction du financement, du nombre de personnes collaborant à la réalisation de l'antenne et des partenaires industriels.

**VIRGO**

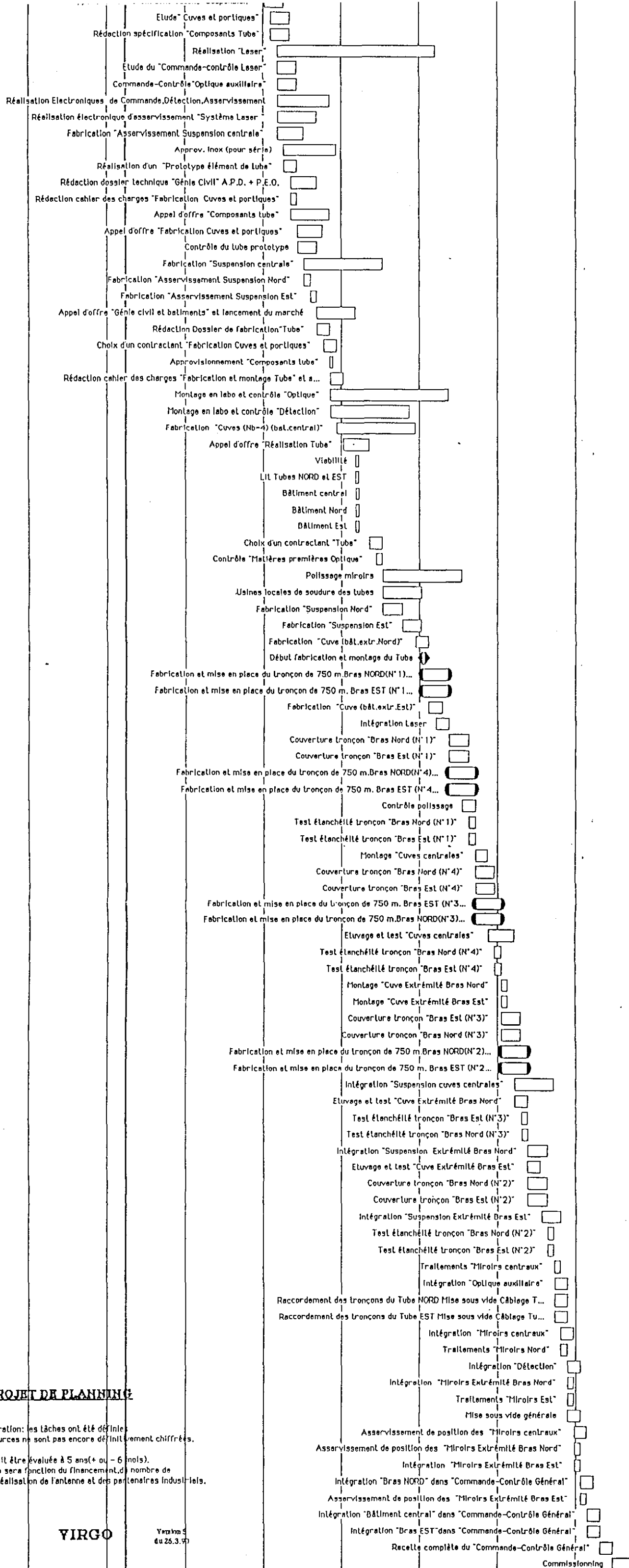
Version 5 du 26.3.90



Nom	Début au + tôt	Mois	Ressource	Nb Mois	Quantité	% effort	Durée	Ressource	Nb Mois	% effort	Durée	Ressource	Nb Mois	% effort
Métriologie "Optique"	3/90	6	Ing.Opt.	6	1,00	100	6							
Spécification du site (sondages, géodésie)	3/90	5												
Calculs de simulation	3/90	6	Thés.	6	1,00	100	6	Ing.Opt.	2	34	5,80			
Etude bruit thermique de la suspension	3/90	6	Phys.	6	1,00	100	6							
Expérimentation "Suspension"	3/90	9	Ing.Méc.	9	1,00	100	9	Ing.Elec.	9	100	9			
Etude de la lumière diffusée	3/90	6	Thés.	6	1,00	100	6	Ing.Opt.	1	17	5,80			
Conception "Optique auxiliaire"	3/90	6	Ing.Opt.	6	1,00	100	6							
Expérimentation "Stabilité pression"	3/90	9	Ing.Vide	9	1,00	100	9							
Conception "Système de Commande-contrôle de l'optique passive"	3/90	9	Ing.Opt.	6	1,00	67	8,95	Ing.Elec.	3	34	8,82	Ing.Com/Cont.	2	23
Conception "Commande-contrôle général"	3/90	9	Ing.Com/Cont.	7	1,00	78	8,97							
Acquisition du site	8/90	3												
Conception "Analyse des données"	3/90	9	Phys.	10	2,00	100	9							
REDACTION "FINAL CONCEPTUAL DESIGN"	12/90	3	All.	3	1,00	100	3							
Rédaction "Cahier des charges Inox" (moins épaisseur tube)	3/91	2	Ing.Méc.	1	1,00	50	2	Ing.Vide	1	50	2			
Rédaction cahier des charges "Etude Tube" et appel de candidatures	3/91	2	Ing.Méc.	1	1,00	50	2	Ing.Vide	1	50	2			
Rédaction environnement "Suspension"	3/91	3	Ing.Méc.	1	1,00	34	2,94							
Etude stabilisation "Système Laser" (Fréquence et puissance)	3/91	12	Ing.Laser	12	1,00	100	12	Ing.Elec.	12	100	12			
Définition filtre spatial Détection	3/91	2	Ing.Opt.	2	1,00	100	2							
1ère Rédaction Cahier des charges "Réalisation prototype élément de Tube"	5/91	2	Ing.Méc.	1	1,00	50	2							
Rédaction cahier des charges "Etude cuve"	6/91	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2	Ing.Vide	1	50	2			
Appel d'offre "Etude Tube"	5/91	2												
Définition optique auxiliaire	3/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1							
Etude et conception des miroirs	3/91	2	Ing.Opt.	2	1,00	100	2							
Rédaction "Environnement Interféromètre"	3/91	4	Ing.Opt.	4	1,00	100	4	Ing.Méc.	4	100	4			
Appel d'offre "Etude Cuve"	8/91	2												
Etude Electroniques de Commande, Détection, Asservissement	3/91	12	Ing.Elec.	12	1,00	100	12	Ing.Com/Cont.	3	25	12			
Réalisation "Laser"	3/92	24	Ing.Laser	24	1,00	100	24	Ing.Méc.	6	25	24			
Rédaction dossier technique "Pompage"	3/91	2	Ing.Vide	2	1,00	100	2							
Rédaction spécification "Matériel à vide"	5/91	1	Ing.Vide	1	1,00	100	1							
Définition "Adaptateur de faisceau"	4/91	2	Ing.Opt.	2	1,00	100	2							
Choix d'un contractant "Etude Tube"	7/91	2												
Rédaction spécification technique "Détecteur"	5/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1							
Rédaction "Environnement Laser"	3/91	2	Ing.Laser	1	1,00	50	2							
Rédaction finale cahier des charges "Réalisation prototype élément de Tube"	7/91	1	Ing.Méc.	1	1,00	100	1							
Rédaction spécification "Polissage"	5/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1							
Définition "Filtre spatial" et "Composants"	4/91	2	Ing.Opt.	2	1,00	100	2							
Rédaction cahier des charges "Etude Traitements"	3/91	3	Ing.Opt.	3	1,00	100	3							
Pré-étude génie civil A.P.S.	7/91	6	Ing.Infras.	6	1,00	100	6							
Rédaction spécification "Matières premières Optique"	5/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1							
Choix d'un contractant "Etude Cuve"	10/91	2												
Commande-Contrôle "Vide"	5/91	4	Ing.Vide	1	1,00	25	4	Ing.Com/Cont.	2	50	4			
Etude Tube	9/91	5	Ing.Méc.	2	1,00	40	5							
Etude Mécanique "Détection"	5/91	6	Ing.Méc.	6	1,00	100	6							
Appel d'offre "Polissage"	6/91	3												
Appel d'offre "Inox"	10/91	2												
Etude "Support"	6/91	6	Ing.Méc.	6	1,00	100	6							
Etude du "Commande-contrôle Laser"	3/92	3	Ing.Laser	1	1,00	34	2,94	Ing.Com/Cont.	2	67	2,98			
Expérimentation "Alignement des miroirs"	3/91	6	Ing.Elec.	6	1,00	100	6							
Appel d'offre "Etude Traitements"	6/91	2												
Concours d'architecte, Bureau d'étude	1/92	4	Ing.Infras.	4	1,00	100	4							
Etude "Amortissement suspension"	3/91	6	Ing.Opt.	1	1,00	17	5,88	Ing.Elec.	6	100	6			
Approvisionnement composants "Détection"	6/91	4												
Appel d'offre "Réalisation prototype élément de Tube"	0/91	2												
Approvisionnement "Matières premières Optique"	6/91	24												
Etude "Cuves et portiques"	2/92	3	Ing.Méc.	1	1,00	34	2,94							
Approv. Inox (pour proto)	12/91	4												
Rédaction dossier technique "Génie Civil" A.P.D. + P.E.O.	5/92	4	Ing.Infras.	4	1,00	100	4							
Choix d'un contractant "Etude et réalisation Traitements"	8/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1							
Réalisation "Support"	12/91	6	Ing.Méc.	1	1,00	17	5,88							
Approv. Inox (pour série)	4/92	8												
Contrôle "Matières premières Optique"	6/93	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1							
Appel d'offre "Matériel à vide"	6/91	3												
Rédaction cahier des charges "Fabrication Cuves et portiques"	5/92	1	Ing.Méc.	1	1,00	100	1							
Choix d'un contractant "Polissage"	9/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1							
Rédaction dossier technique "Alignement des miroirs"	9/91	3	Ing.Elec.	3	1,00	100	3	Ing.Opt.	2	67	2,98			
Rédaction dossier technique "Suspension"	9/91	4	Ing.Méc.	3	1,00	75	4	Ing.Elec.	2	50	4			
Commande-Contrôle "Optique auxiliaire"	3/92	3	Ing.Opt.	1	1,00	50	2	Ing.Com/Cont.	2	100	2			
Choix d'un contractant "Prototype élément de Tube"	10/91	1												
Rédaction spécification "Composants Tube"	2/92	3	Ing.Vide	1	1,00	34	2,94							
"Etude et réalisation Traitements"	9/91	40												
Appel d'offre "Génie civil et bâtiments" et lancement du marché	9/92	6	Ing.Infras.	6	1,00	100	6							
Réalisation d'un "Prototype élément de tube"	4/92	2	Ing.Méc.	1	1,00	50	2							
Réalisation Mécanique "Détection"	11/91	6	Ing.Méc.	1	1,00	17	5,88							
Approvisionnement "Adaptateur de faisceau"	6/91	8												
Polissage miroirs	7/93	12												
Appel d'offre "Fabrication Cuves et portiques"	6/92	4												
Approvisionnement filtre et composants	6/91	6												
Contrôle du tube prototype	6/92	3	Ing.Vide	2	1,00	67	2,98	Ing.Méc.	2	67	2,98			
Contrôle polissage	7/94	2	Ing.Opt.	1	1,00	50	2							
Rédaction Dossier de fabrication "Tube"	9/92	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2							
Appel d'offre "Composants tube"	5/92	6												
Commande-Contrôle "Suspension"	1/92	3	Ing.Elec.	3	1,00	100	3							
Réalisation Electroniques de Commande, Détection, Asservissement	3/92	8	Ing.Elec.	8	1,00	100	8							
Rédaction cahier des charges "Fabrication et montage Tube" et appel de candidatures	11/92	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2							
Commande-contrôle "Alignement des miroirs"	12/91	3	Ing.Opt.	1	1,00	34	2,94	Ing.Com/Cont.	2	67	2,98			
Réalisation électronique d'asservissement "Système Laser"	3/92	6	Ing.Elec.	2	1,00	34	5,88							
Réalisation "Amortissement"	1/92	6	Ing.Elec.	5	1,00	85	5,08							
Choix d'un contractant "Fabrication Cuves et portiques"	10/92	2												
Viabilité	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0							
Appel d'offre + choix contractant "Alignement des miroirs"	12/91	3												
Lit Tubes NORD et EST	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0							
Appel d'offre + choix contractant "Suspension"	1/92	3												
Montage en labo et contrôle "Optique"	11/92	18	Ing.Opt.	18	1,00	100	18	Ing.Elec.	6	34	17,64			
Approvisionnement "Composants tube"	11/92	0												
Appel d'offre "Réalisation Tube"	1/93	4	Ing.Méc.	2	1,00	50	4							
Choix d'un contractant "Tube"	5/93	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2							
Fabrication "Suspension centrale"	7/92	12												
Approvisionnement "Matériel à vide" + "Appareillage de rampe à l'air"	9/91	0												
Traitements "Miroirs centraux"	9/95	1												
Usines locales de soudure des tubes	7/93	6												
Début fabrication et montage du Tube	1/94	0												
Fabrication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras NORD (N°1) (colé bal. central) + pompes, jauges,	1/94	4												
Bâtiment central	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0							
Fabrication "Asservissement Suspension centrale"	3/92	4												
Intégration Laser	3/94	2	Ing.Laser	2	1,00	100	2							
Couverture tronçon "Bras Nord (N°1)"	5/94	3	Ing.infras.	3	1,00	100	3							

Approv. Inox (pour proto)	12/91	4	Ing.Infras.	4	1,00	100	4											
Rédaction dossier technique "Génie Civil" A.P.D. + P.E.O.	5/92	4	Ing.Infras.	4	1,00	100	4											
Choix d'un contractant "Etude et réalisation Traitements"	8/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1											
Réalisation "Support"	12/91	6	Ing.Méc.	1	1,00	17	5,88											
Approv. Inox (pour série)	4/92	8																
Contrôle "Matières premières-Optique"	6/93	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1											
Appel d'offre "Matériel à vide"	6/91	3																
Rédaction cahier des charges "Fabrication Cuves et portiques"	5/92	1	Ing.Méc.	1	1,00	100	1											
Choix d'un contractant "Polissage"	9/91	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1											
Rédaction dossier technique "Alignement des miroirs"	9/91	3	Ing.Elec.	3	1,00	100	3	Ing.Opt.	2	67	2,98							
Rédaction dossier technique "Suspension"	9/91	4	Ing.Méc.	3	1,00	75	4	Ing.Elec.	2	50	4							
Commande-Contrôle "Optique auxiliaire"	3/92	3	Ing.Opt.	1	1,00	50	2	Ing.Com/Cont.	2	100	2							
Choix d'un contractant "Prototype élément de Tube"	10/91	1																
Rédaction spécification "Composants Tube"	2/92	3	Ing.Vide	1	1,00	34	2,94											
"Etude et réalisation Traitements"	9/91	48																
Appel d'offre "Génie civil et bâtiments" et lancement du marché	9/92	6	Ing.Infras.	6	1,00	100	6											
Réalisation d'un "Prototype élément de Tube"	4/92	2	Ing.Méc.	1	1,00	50	2											
Réalisation Mécanique "Détection"	11/91	6	Ing.Méc.	1	1,00	17	5,88											
Approvisionnement "Adaptateur de faisceau"	6/91	8																
Polissage miroirs	7/93	12																
Appel d'offre "Fabrication Cuves et portiques"	6/92	4																
Approvisionnement filtre et composants	6/91	6																
Contrôle du tube prototype	6/92	3	Ing.Vide	2	1,00	67	2,98	Ing.Méc.	2	67	2,98							
Contrôle polissage	7/94	2	Ing.Opt.	1	1,00	50	2											
Rédaction Dossier de fabrication "Tube"	9/92	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2											
Appel d'offre "Composants Tube"	5/92	6																
Commande-Contrôle "Suspension"	1/92	3	Ing.Elec.	3	1,00	100	3											
Réalisation Electroniques de Commande, Détection, Asservissement	3/92	8	Ing.Elec.	8	1,00	100	8											
Rédaction cahier des charges "Fabrication et montage Tube" et appel de candidatures	11/92	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2											
Commande-contrôle "Alignement des miroirs"	12/91	3	Ing.Opt.	1	1,00	34	2,94	Ing.Com/Cont.	2	67	2,98							
Réalisation électronique d'asservissement "Système Leser"	3/92	6	Ing.Elec.	2	1,00	34	5,88											
Réalisation "Amortissement"	1/92	6	Ing.Elec.	5	1,00	85	5,88											
Choix d'un contractant "Fabrication Cuves et portiques"	10/92	2																
Viabilité	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0											
Appel d'offre + choix contractant "Alignement des miroirs"	12/91	3																
Lit Tubes NORD et EST	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0											
Appel d'offre + choix contractant "Suspension"	1/92	3																
Montage en labo et contrôle "Optique"	11/92	18	Ing.Opt.	18	1,00	100	18	Ing.Elec.	6	34	17,64							
Approvisionnement "Composants Tube"	11/92	0																
Appel d'offre "Réalisation Tube"	1/93	4	Ing.Méc.	2	1,00	50	4											
Choix d'un contractant "Tube"	5/93	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2											
Fabrication "Suspension centrale"	7/92	12																
Approvisionnement "Matériel à vide" + "Appareillage de remise à l'air"	9/91	0																
Traitements "Miroirs centraux"	9/95	1																
Usines locales de soudure des tubes	7/93	6																
Début fabrication et montage du Tube	1/94	0																
Fabrication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras NORD(N°1) (colé bal. central) + pompes, jauges, v.	1/94	4																
Bâtiment central	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0											
Fabrication "Asservissement Suspension centrale"	3/92	4																
Intégration Laser	3/94	2	Ing.Laser	2	1,00	100	2											
Couverture tronçon "Bras Nord (N°1)"	5/94	3	Ing.Infras.	3	1,00	100	3											
Test étanchéité tronçon "Bras Nord (N°1)"	8/94	1	Ing.Vide	1	1,00	100	1											
Fabrication "Cuves (Nb=4) (bal. central)"	12/92	12																
Montage en labo et contrôle "Détection"	11/92	12	Ing.Opt.	12	1,00	100	12	Ing.Elec.		50	12							
Fabrication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras EST (N°1) (coté bal. central) + pompes, jauges, v.	1/94	4																
Couverture tronçon "Bras Est (N°1)"	5/94	3	Ing.Infras.	3	1,00	100	3											
Test étanchéité tronçon "Bras Est (N°1)"	8/94	1	Ing.Vide	1	1,00	100	1											
Montage "Cuves centrales"	9/94	2	Ing.Méc.	2	1,00	100	2											
Eluvage et test "Cuves centrales"	11/94	4	Ing.Vide	4	1,00	100	4											
Intégration "Suspension cuves centrales"	3/95	6	Ing.Méc.	6	1,00	100	6											
Intégration "Miroirs centraux"	10/95	2	Ing.Opt.	2	1,00	100	2	Ing.Méc.	2	100	2							
Asservissement de position des "Miroirs centraux"	12/95	2																
Fabrication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras NORD(N°4) (coté extrémité) + pompes, jauges, v.	5/94	4																
Bâtiment Nord	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0											
Couverture tronçon "Bras Nord (N°4)"	9/94	3	Ing.Infras.	0	1,00	100	0											
Fabrication "Asservissement Suspension Nord"	7/92	1																
Fabrication "Suspension Nord"	7/93	3																
Test étanchéité tronçon "Bras Nord (N°4)"	12/94	1	Ing.Vide	1	1,00	100	1											
Intégration "Optique auxiliaire"	9/95	2	Ing.Opt.	0	1,00	0	0	Ing.Méc.	0	0	0							
Traitements "Miroirs Nord"	10/95	1																
Intégration "Détection"	11/95	2																
Intégration "Bâtiment central" dans "Commande-Contrôle Général"	2/96	2																
Fabrication "Cuve (bât. extr. Nord)"	12/93	2																
Montage "Cuve Extrémité Bras Nord"	1/95	1	Ing.Méc.	1	1,00	100	1											
Eluvage et test "Cuve Extrémité Bras Nord"	3/95	2	Ing.Vide	2	1,00	100	2											
Intégration "Suspension Extrémité Bras Nord"	5/95	3	Ing.Méc.	3	1,00	100	3											
Intégration "Miroirs Extrémité Bras Nord"	11/95	1	Ing.Opt.	1	1,00	100	1	Ing.Méc.	1	100	1							
Fabrication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras EST (N°4) (coté extrémité) + pompes, jauges, v.	5/94	4																
Fabrication "Cuve (bât. extr. Est)"	2/94	2																
Asservissement de position des "Miroirs Extrémité Bras Nord"	12/95	1																
Couverture tronçon "Bras Est (N°4)"	9/94	3	Ing.Infras.	3	1,00	100	3											
Bâtiment Est	3/93	0	Ing.Infras.	0	1,00	100	0											
Test étanchéité tronçon "Bras Est (N°4)"	12/94	1	Ing.Vide	1	1,00	100	1											
Fabrication "Asservissement Suspension Est"	8/92	1																
Fabrication "Suspension Est"	10/93	3																
Traitements "Miroirs Est"	11/95	1																
Montage "Cuve Extrémité Bras Est"	1/95	1	Ing.Méc.	1	1,00	100	1											
Intégration "Bras NORD" dans "Commande-Contrôle Général"	1/96	2																
Eluvage et test "Cuve Extrémité Bras Est"	5/95	2	Ing.Vide	2	1,00	100	2											
Intégration "Suspension Extrémité Bras Est"	7/95	3	Ing.Méc.	3	1,00	100	3											
Fabrication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras EST (N°3) (coté centre-Est) + pompes, jauges, v.	9/94	4																
Fabrication et mise en place du tronçon de 750 m. Bras NORD(N°3) (coté centre-Est) + pompes, jauges, v.	9/94	4																
Intégration "Miroirs Extrémité Bras Est"	12/95	1	Ing.Opt.	1	1,0													





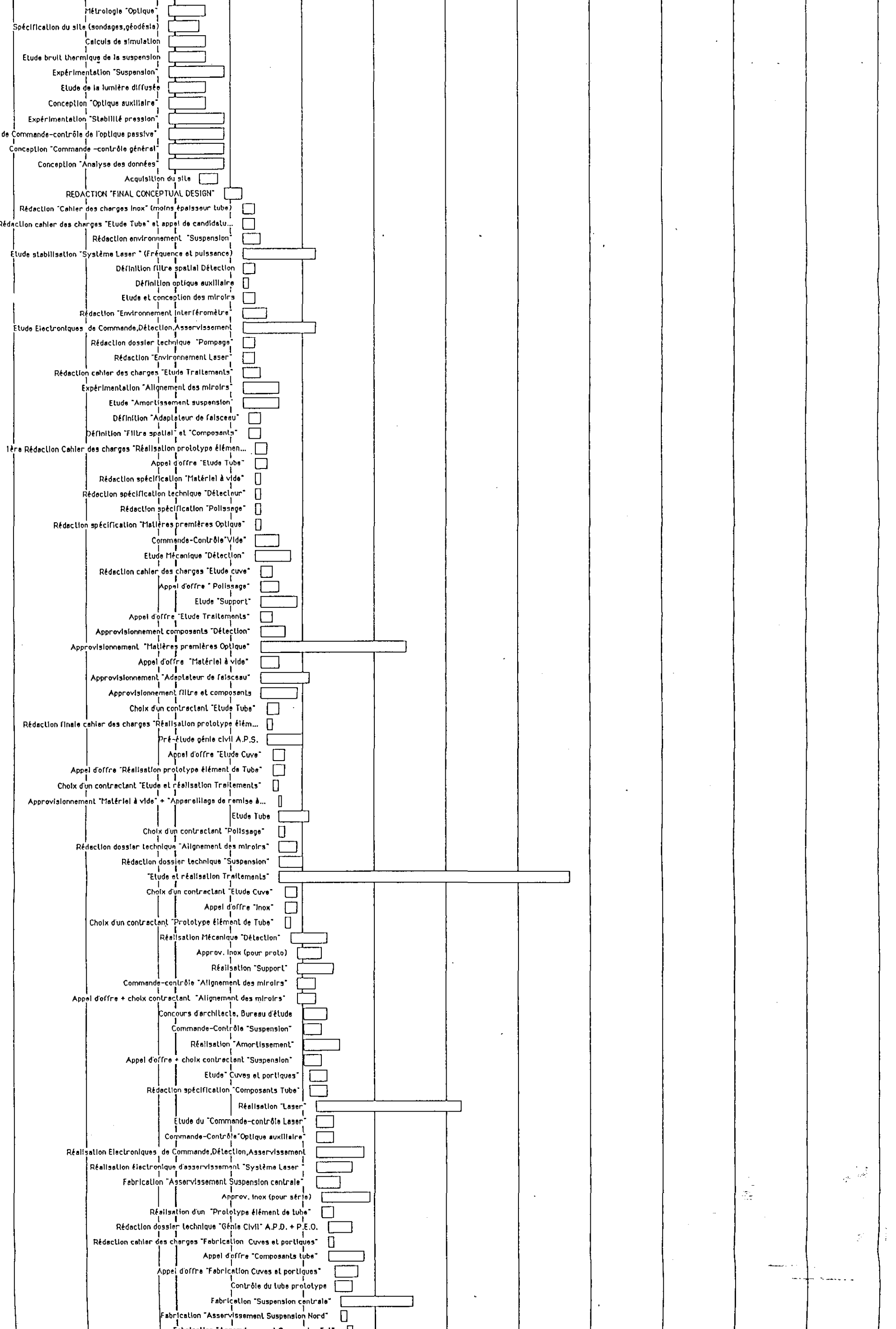
**AVANT-PROJET DE PLANNING**

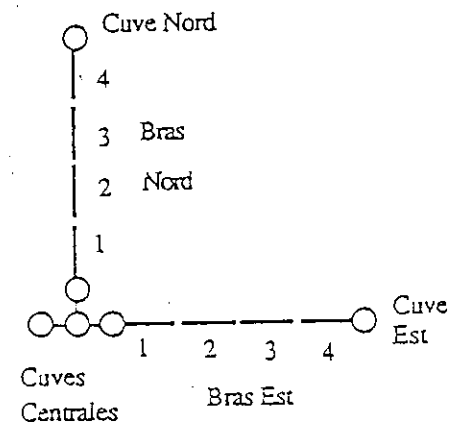
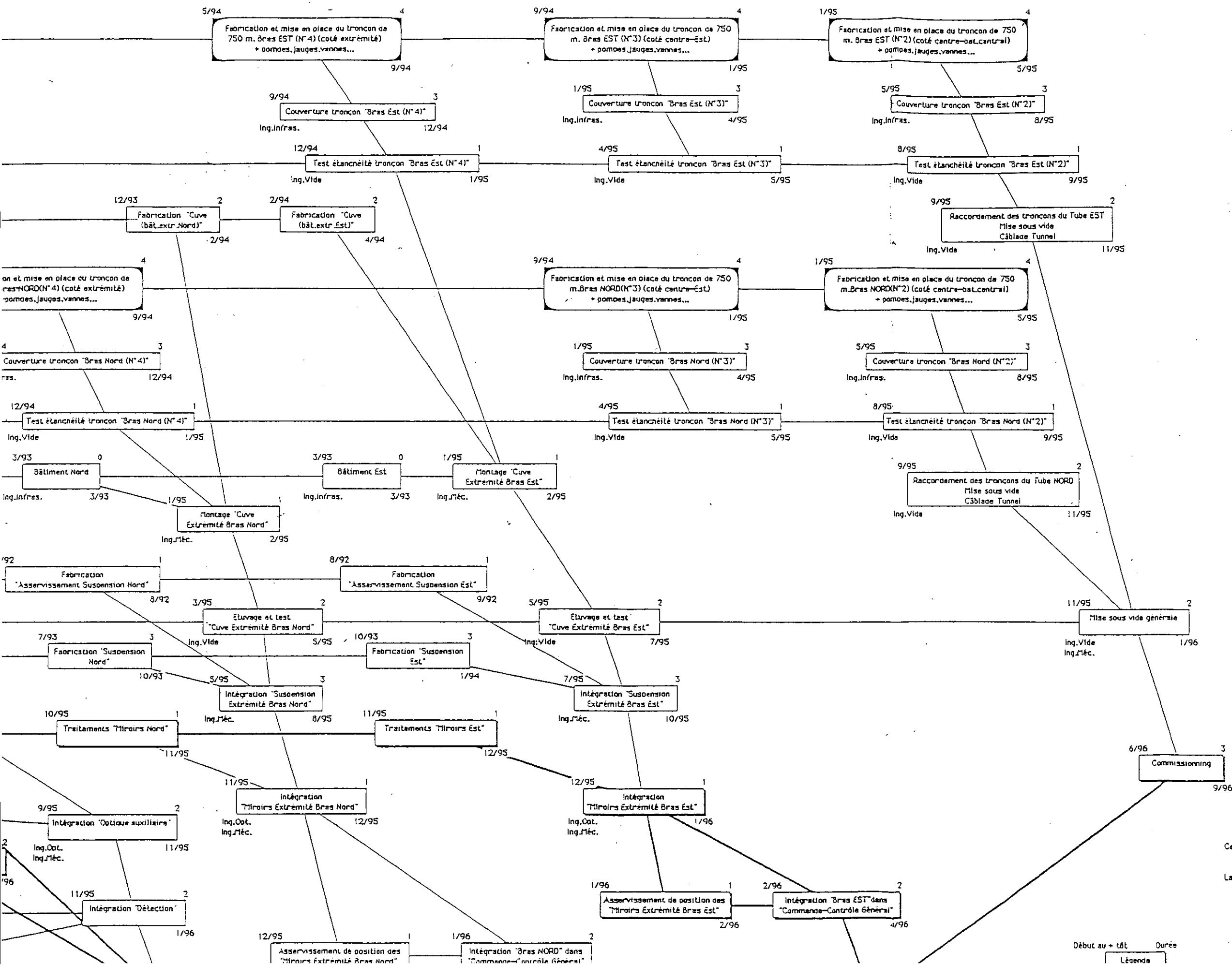
Le planning est en cours d'élaboration: les tâches ont été définies, mais les durées et les ressources ne sont pas encore définitivement chiffrées.

Le coût total du projet pourrait être évalué à 5 ans (+ ou - 6 mois). Il est évident que cette durée sera fonction du financement, du nombre de personnes collaborant à la réalisation de l'antenne et des partenaires industriels.

**VIRGO**

Version 5  
du 26.3.97





**AVANT-PROJET DE PLANNING**

Ce planning est en cours d'élaboration: les tâches ont été définies mais les durées et les ressources ne sont pas encore définitivement chiffrées.

La durée totale du projet pourrait être évaluée à 5 ans(+ ou - 6 mois). Il est évident que cette durée sera fonction du financement, du nombre de personnes collaborant à la réalisation de l'antenne et des partenaires industriels.

Début au + tôt    Durée  
Légende



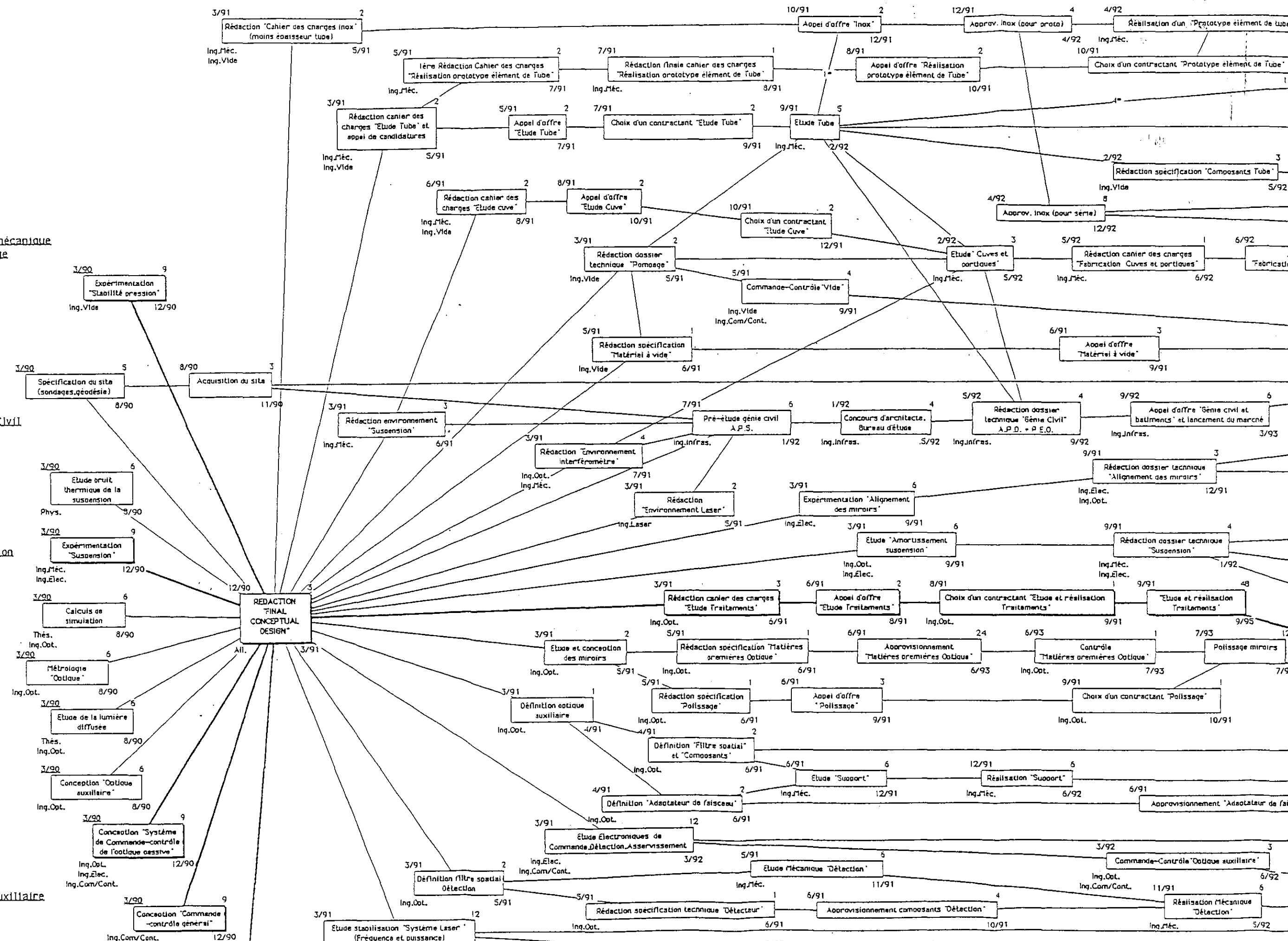
Génie mécanique  
Pompage

Génie Civil

Suspension

Miroirs

Optique auxiliaire



Génie mécanique  
Pompage

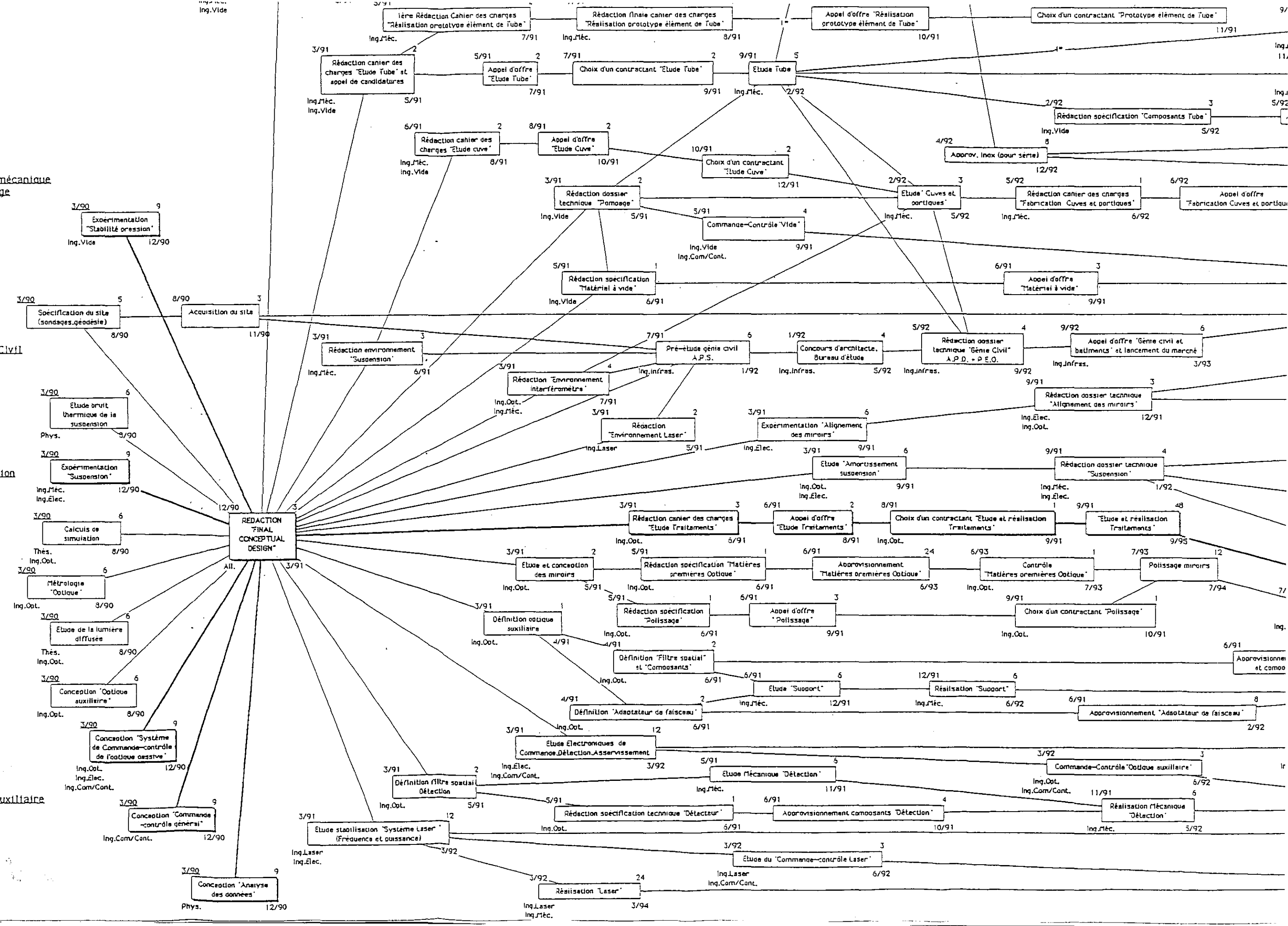
Génie Civil

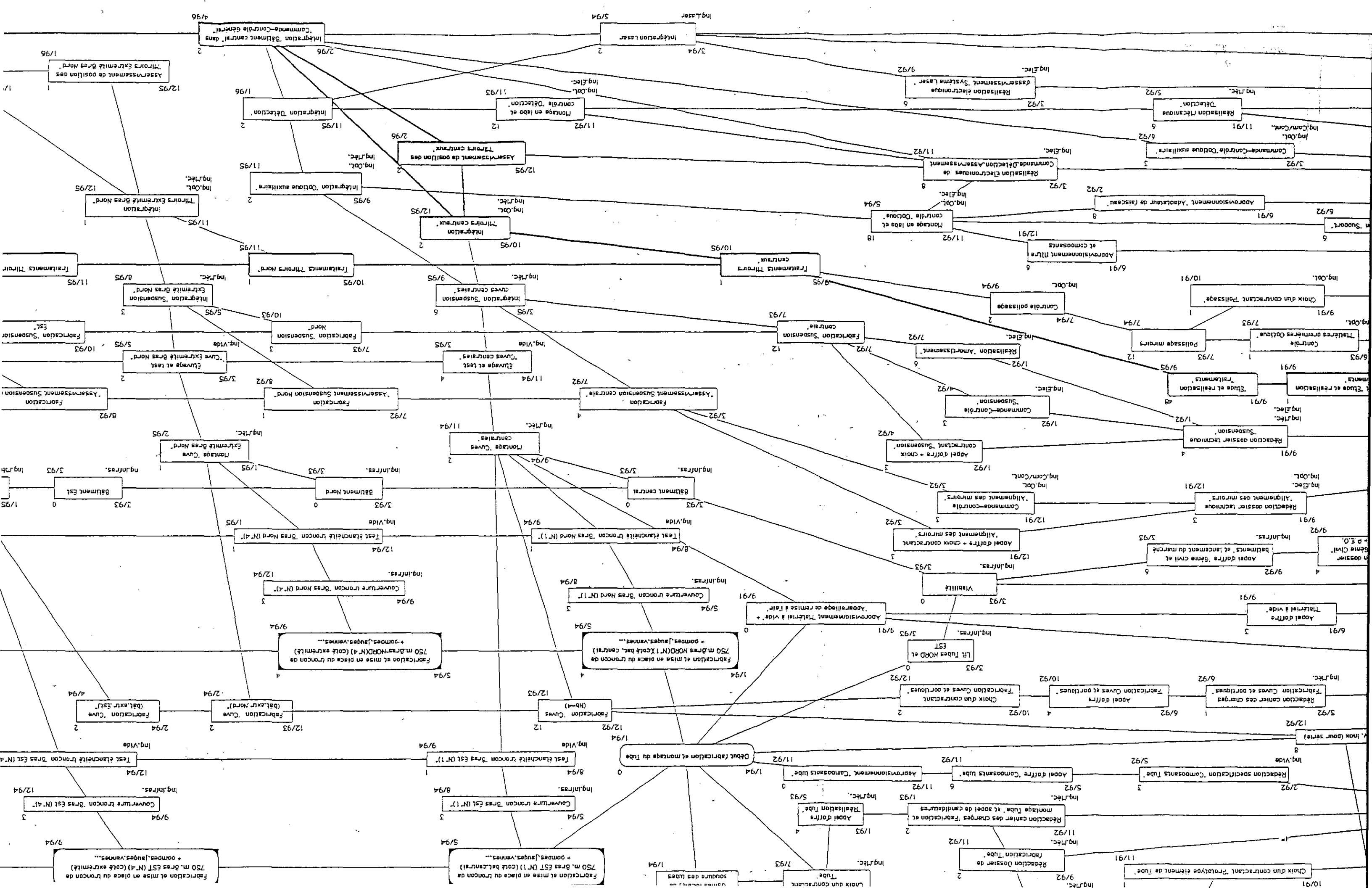
Suspension

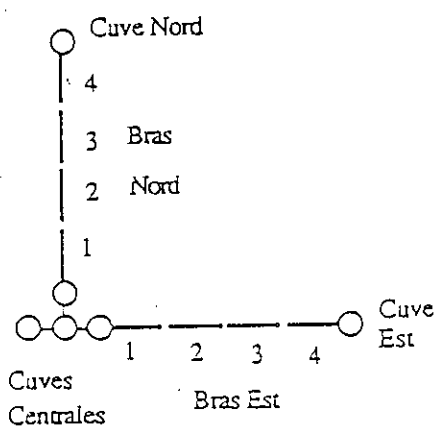
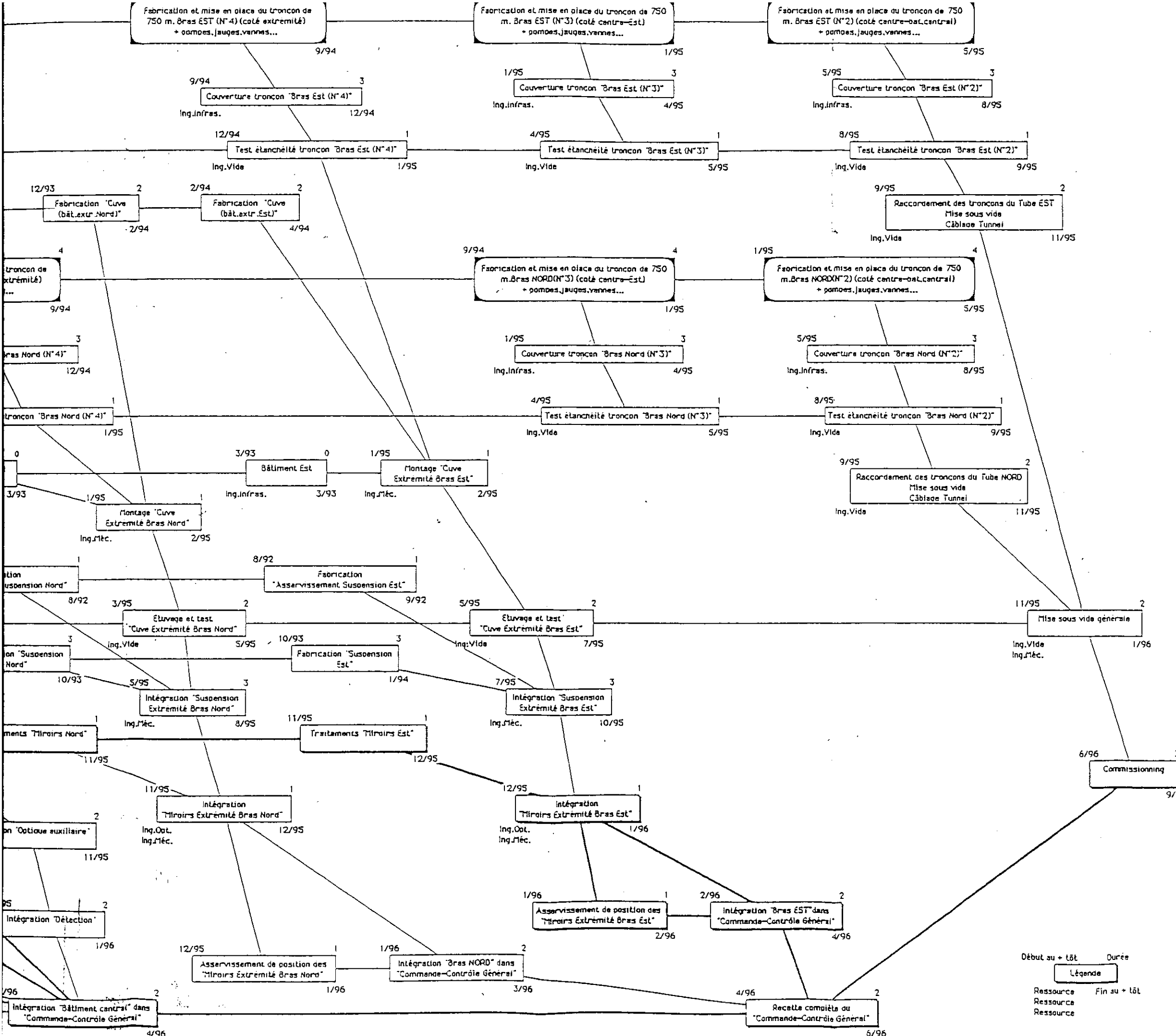
Miroirs

Optique auxiliaire

Laser



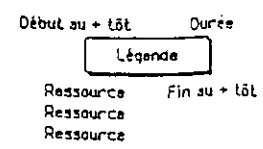




**AYANT-PROJET DE PLANNING**

Ce planning est en cours d'élaboration: les tâches ont été définies mais les durées et les ressources ne sont pas encore définitivement chiffrées.

La durée totale du projet pourrait être évaluée à 5 ans (+ ou - 6 mois). Il est évident que cette durée sera fonction du financement, du nombre de personnes collaborant à la réalisation de l'antenne et des partenaires industriels.





## PROJET VIRGO

### AVANT-PROJET DE PLANNING PREVISIONNEL

Les documents ci-joints constituent le planning prévisionnel du projet VIRGO tel qu'il est établi au 28.03.90 ; il est fondé sur un découpage en tâches plus détaillé que celui figurant dans le rapport sur l'étude de l'organisation et du coût du projet VIRGO.

Ce planning comprend :

- un diagramme PERT d'enchaînement des tâches
- un diagramme de GANTT des tâches
- un tableau "de projet" avec les tâches répertoriées et le personnel nécessaire
- un diagramme de GANTT du personnel indiquant les durées pendant lesquelles ce personnel doit être disponible même s'il n'est pas utilisé à temps plein pendant cette durée.

Il est une bonne base de travail pour établir le séquençement des tâches avec les implications de ce séquençement sur le délai final à partir des tâches les plus longues ("chemin critique"), ainsi que pour permettre une évaluation plus détaillée du personnel nécessaire.

Ce document est donc essentiel dès qu'il s'agit de répartir les tâches dans un groupe de projet comprenant plusieurs équipes.

Cependant, il n'a pas encore été possible de travailler suffisamment en profondeur sur ce planning pour en faire un document définitif et les durées des tâches ainsi que les ressources demandent à être mieux cernées. En particulier le chemin critique est établi à partir d'un délai global donné par un sous-traitant pour les miroirs, mais les discussions ultérieures menant au Final Conceptual Design devraient permettre d'affiner ces évaluations et d'amener à une évaluation plus précise du délai global, qui restera quand même contraint par la réalisation des deux tubes à vide.