

S

## SUPERPHENIX

**Fabrication des  
générateurs de vapeur,  
Choix du matériau des  
tubes d'échange**

**Inspection en service des  
tubes d'échange et de la  
cuve principale**

**Denis Buisine  
François Champigny  
EDF**

E

3

2

1

4

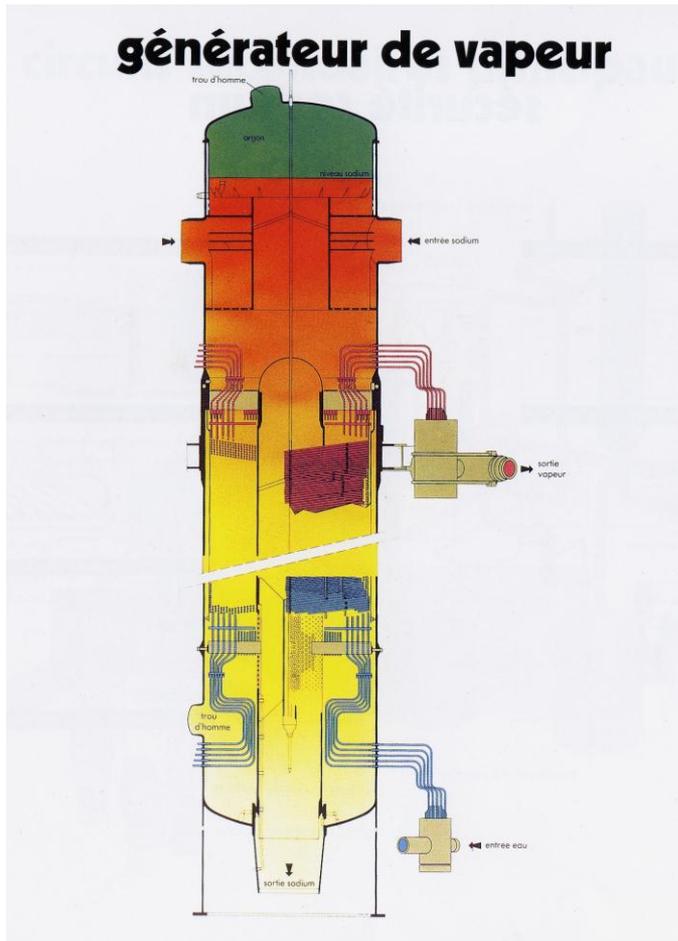
N

915  
13 10 83

# Plan de la présentation

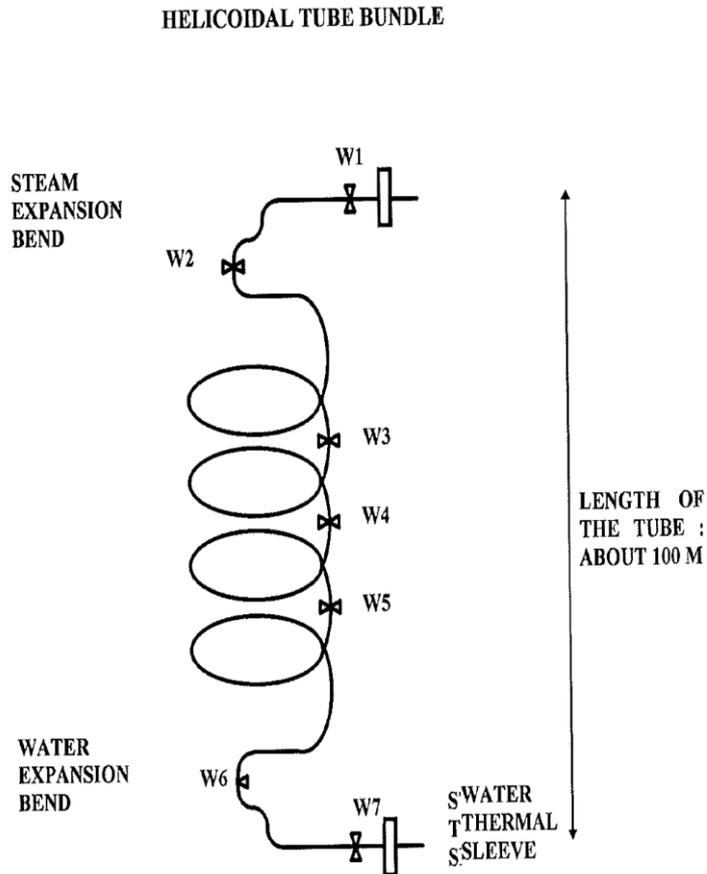
- ▶ Fabrication des générateurs de vapeur, choix du matériau des tubes d'échange
  - Description sommaire des caractéristiques des GV de Superphénix
  - Les matériaux utilisés
  - L'origine des choix réalisés
  
- ▶ Contrôle en service de la cuve et des générateurs de vapeur
  - Le bloc réacteur,
  - Le Module d'Inspection des Réacteurs rapides (MIR)
  - Résultats et enseignements tirés
  - Les Générateurs de Vapeur

# Les GV de Superphénix (1)



<b>Nombre</b>	<b>4</b>
Température d'entrée sodium	525°C
Température de sortie sodium	345°C
Température entrée eau	235°C
Température sortie eau	490°C
Pression de vapeur surchauffée	184 bar
Hauteur totale	22 m
diamètre	2,9m

# Les GV de Superphénix (2)



<b>Nombre de tubes</b>	<b>357</b>
Faisceau tubulaire	hélicoïdal
Diamètre extérieur des tubes	25 mm
Épaisseur des tubes	2,5 mm
Matériau du tube	Alliage 800

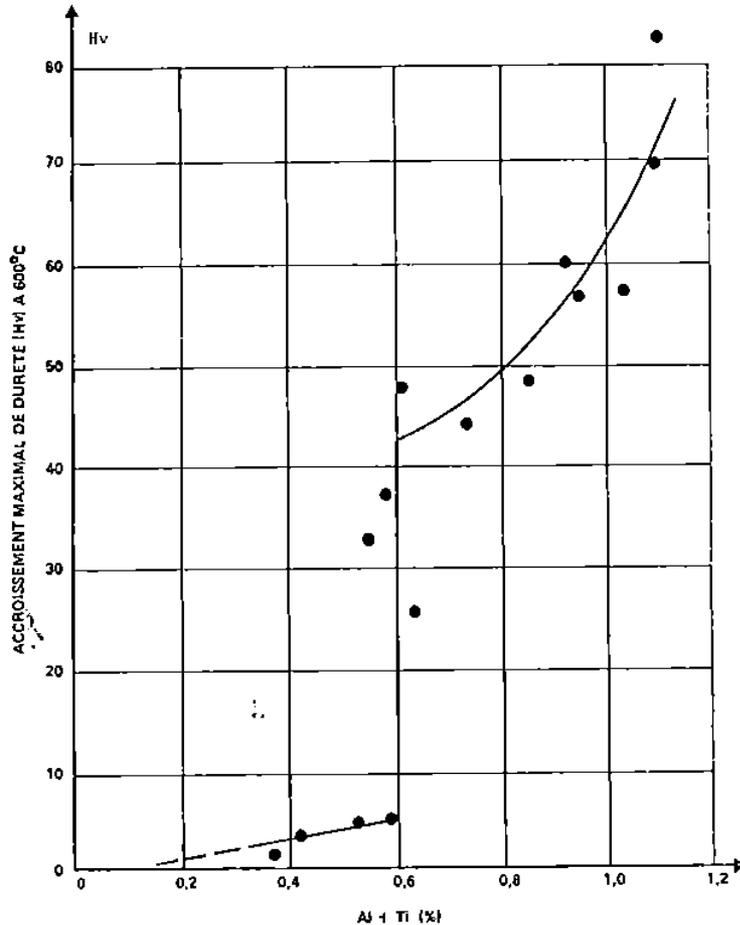
# Les matériaux candidats à l'époque (1)

Structure métallurgique	Matériau considéré
Ferritique	10CD9-10 (10 Cr Mo 9-10)
	10CDNb9-10 (10 Cr Mo Nb 9-10)
Ferrito - martensitique	Z10CD9 (X10 Cr Mo 9)
	Z10CDNbV9,2 (X10 Cr Mo Nb V 9-2)
Austénitique	321 - Z6CNT18-12 - X6 Cr Ni Ti 18-12
	Alliage 800

# Les matériaux candidats à l'époque (2)

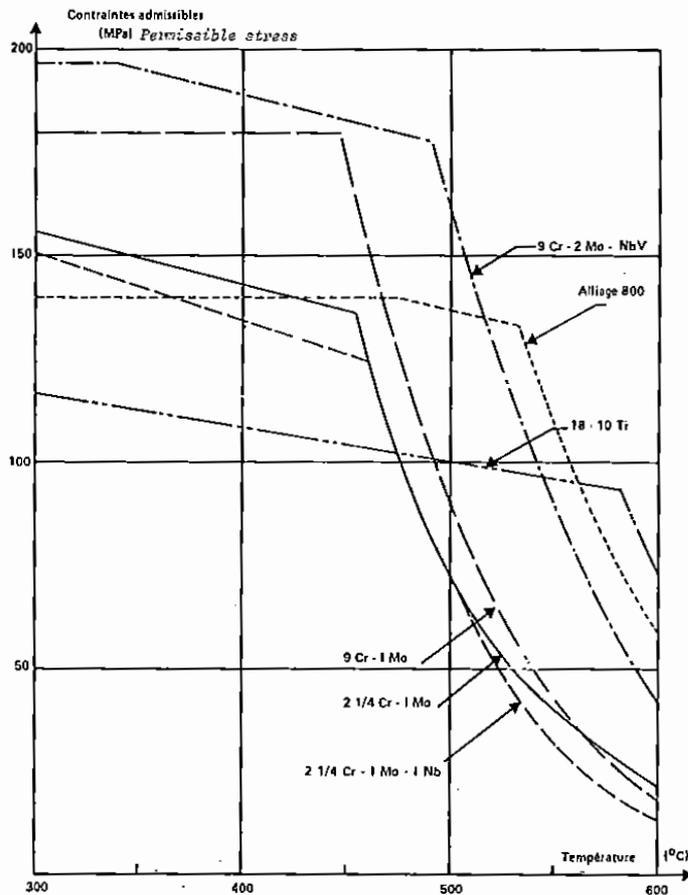
Matériau	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	V	Nb
10CD9-10	< 0,15	0,3 0,6	2 2,5		0,9 1,1				
10CDNb9-10	< 0,1	0,4 0,8	2 2,5		0,9 1,1				> 10C
Z10CD9	< 0,15	0,3 0,6	8 10		0,9 1,1				
Z10CDNbV9 2	< 0,15	0,8 1,3	8,5 10,5		1,7 2,3			0,2 0,4	0,3 0,55
321 (Z6CNT18-12)	0,04 0,08	< 1	17 19	10 13			4C		
Alliage 800	0,03 0,06	< 1,5	19 23	30 35		0,15 0,60	0,15 0,60		

# Un focus sur la métallurgie de l'alliage 800



- ▶ Deux « grades » d'alliage 800 :
  - Grade 1 hypertrempé à 980 ° C (pour les utilisations à haute température)
  - Grade 2 hypertrempé à 1150° C
- ▶ la teneur en Ti + Al gouverne la précipitation  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{TiAl}$ )

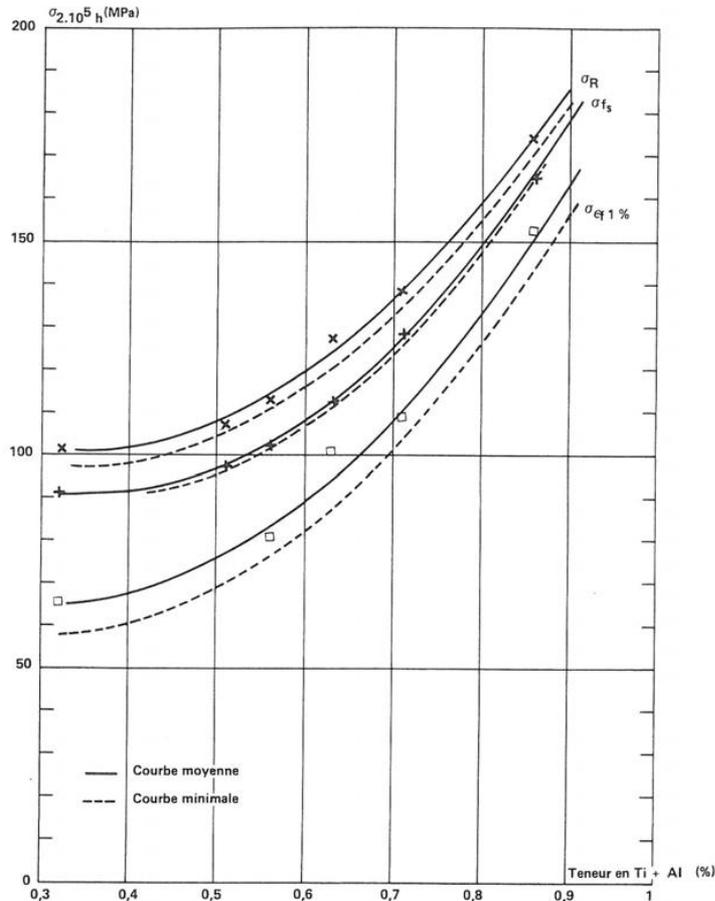
# Origine du choix réalisé – comportement mécanique (1)



► Le comportement mécanique en traction à 525° C identifie deux matériaux candidats privilégiés :

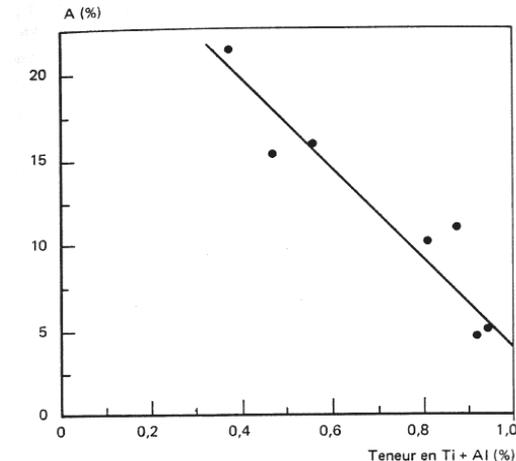
- Z10CDNbV9 2
- Alliage 800

# Origine du choix réalisé – comportement mécanique (2) – Alliage 800

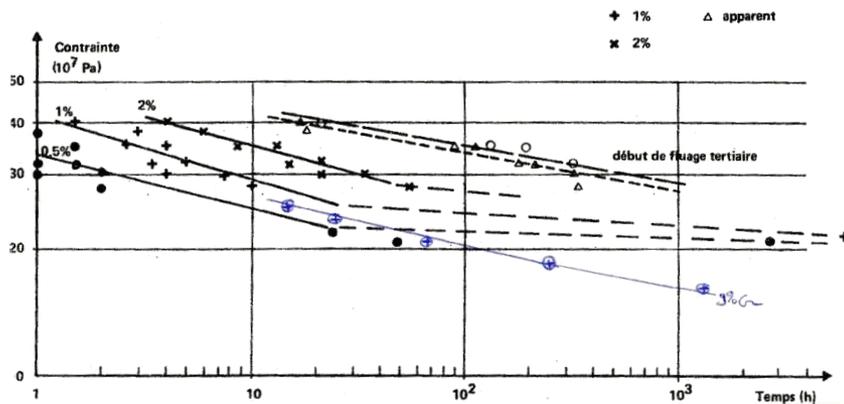


- ▶ La teneur en Ti+Al augmente la durée de vie en fluage mais diminue la ductilité
- $\gamma'$  précipite en service influençant le comportement en fluage
- Le bénéfice induit par  $\gamma'$  présente un optimum dans le temps

## ▶ Fatigue



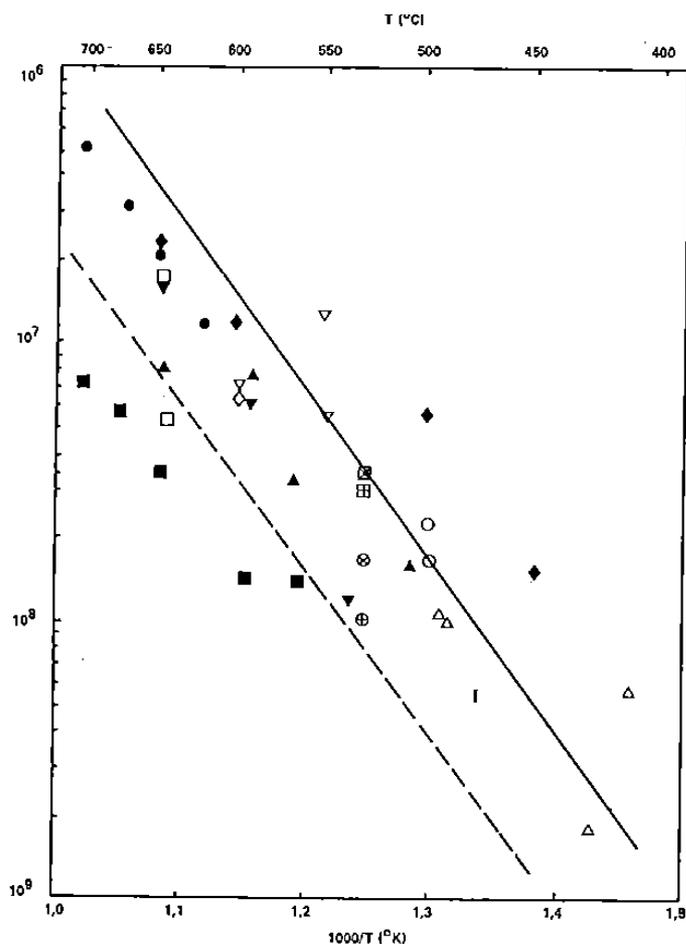
# Origine du choix réalisé – comportement mécanique (3) – Z10CDNbV9 2



► Bon comportement du Z10CDNbV9 2 en fluage (résultats à  $550^{\circ}$  C)

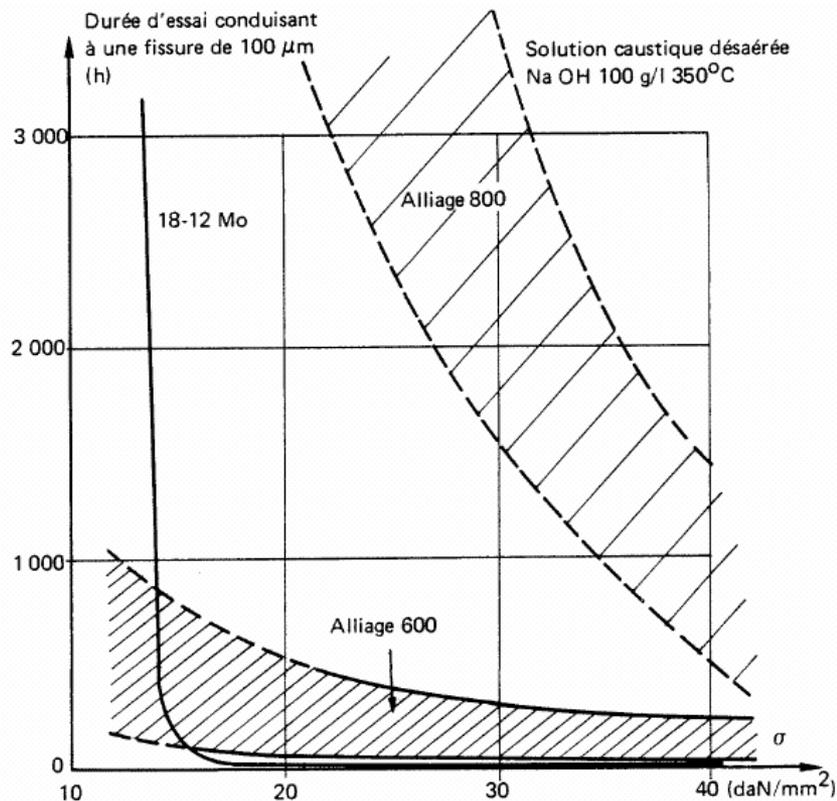
► une transition de la résilience élevée à l'époque

# Effet du sodium / conditions normales de fonctionnement



- ▶ Décarburation en surface des aciers faiblement alliés (en fonction de la pureté du Na)
- ▶ Effet du sodium sur le fluage du 800 et sur l'acier Z10CDNbV9 2 évoqué à l'époque mais mal connu

# Effet du sodium / conditions accidentelles => pollution par la soude



## ► Milieu soude :

- Corrosion sous contrainte des austénitiques (meilleure résistance du 800)

## ► Sodium pollué par la soude

- Corrosion généralisée des ferritiques marquée pour le 9% de Cr

# Choix du matériau

matériau	Comportement mécanique	Comportement environnement nominal	Comportement environnement accidentel
10CD9-10	-	-	=
10CDNb9-10	-	-	=
Z10CD9	-	=	-
Z10CDNbV9 2	+	+	-
321 (Z6CNT18-12)	=	=	-
Alliage 800	+	+	+

Alliage 800 grade 1 avec teneur en Ti+Al supérieure à 0,55% pour usage à haute température mais inférieure à 0,75%

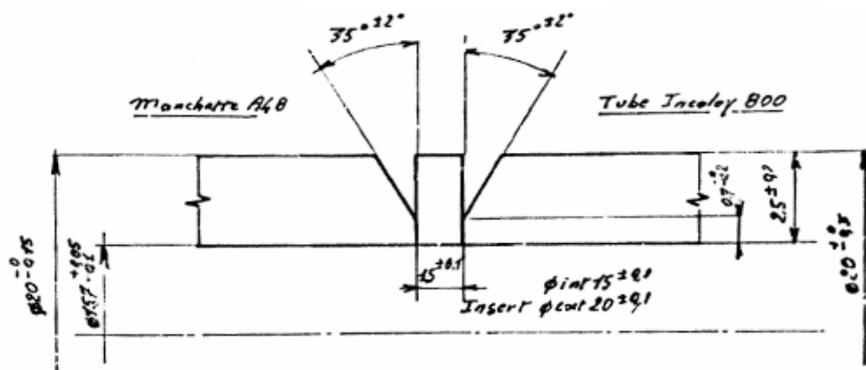
Programme de surveillance en four (fluage de capsules)

# Éléments marquants de la fabrication – choix des tubes

	Ti+ Al (%)	
	mini	Maxi
Spécification SPX	0,45	0,75
Zone chaude	0,55	0,75

- ▶ La spécification d’approvisionnement en Ti + Al était large
- ▶ Un tri des tubes a dû être fait pour prendre les teneurs Ti + Al maximales pour les zones chaudes

# Éléments marquants de la fabrication – soudage



Soudage par procédé TIG à tête orbitale en deux passes avec métal d'apport en alliage 82  
40% des soudures rebutées (géométrie des soudures, défauts métallurgiques)

Matériau	C	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti	Nb
Inconel 82	< 0,1	2,5 3,5	18 22	> 67	< 3	< 0,75	2 3

# Conclusion

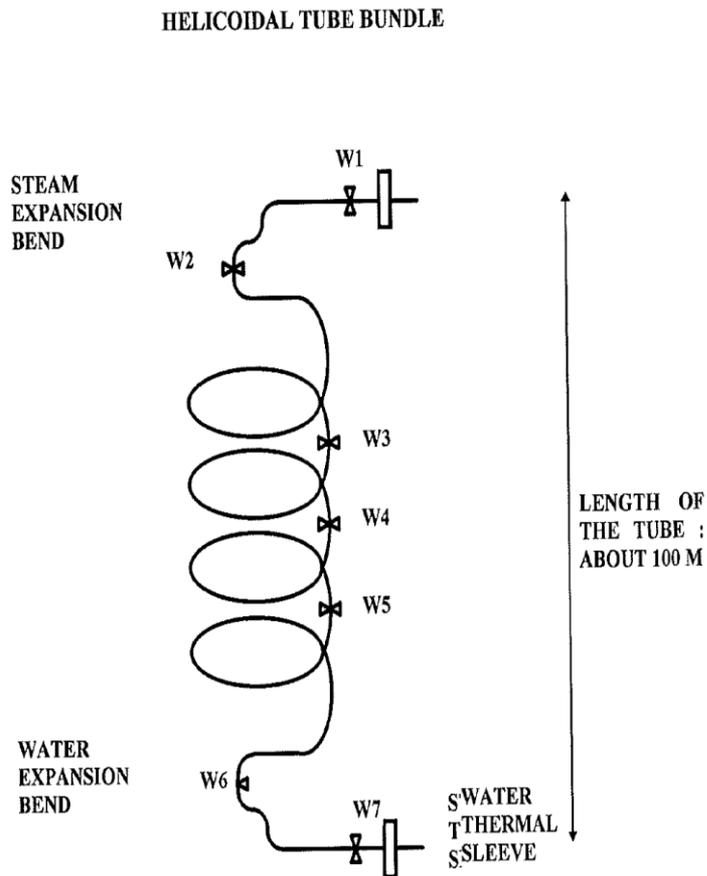
- ▶ Parmi les candidats examinés à l'époque :
  - L'Alliage 800 grade 1 avec teneur en Ti+Al comprise entre 0,55% et 0,75% a été retenu
  - L'acier Z10CDNbV9 2 était le matériau concurrent
- ▶ Les progrès des connaissances sur le Z10CDNbV9 2 peuvent réinterroger ce choix
- ▶ En cas de réutilisation de l'alliage 800 :
  - Comprendre les résultats du programme de surveillance en four
  - Revoir les modalités de soudage
- ▶ La tenue mécanique des joints soudés est très peu abordée

# L'INSPECTION EN SERVICE DES GV ET DE LA CUVE DE SPX

# L'inspection en service de la cuve et des générateurs de vapeur de Superphénix

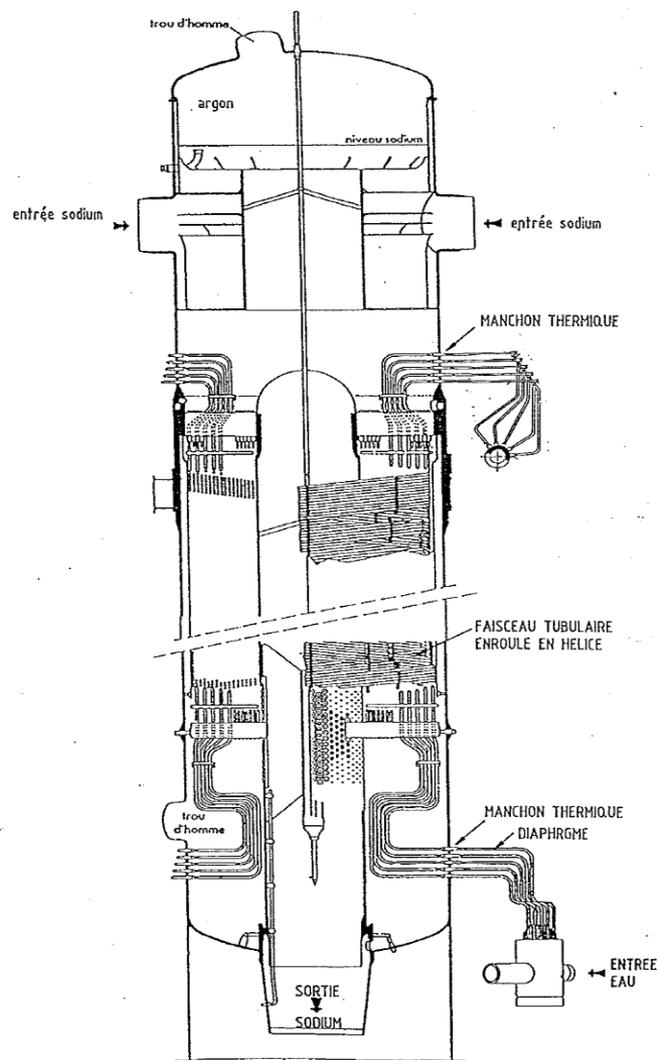
- ▶ L'inspection en service a pour but de rechercher d'éventuelles dégradations survenant pendant le fonctionnement de l'outil de production.
- ▶ Elle met en œuvre des méthodes d'essais non destructives surfaciques, volumiques ou visuelles (télévisuelles).
- ▶ Pour les générateurs de vapeur et la cuve, les méthodes retenues sont de type magnétique (courants de Foucault par des sondes internes dans les tubes, ultrasons à l'aide de capteurs adaptés, examens télévisuels par caméras embarquées.

# Les tubes des générateurs de vapeur de Superphénix



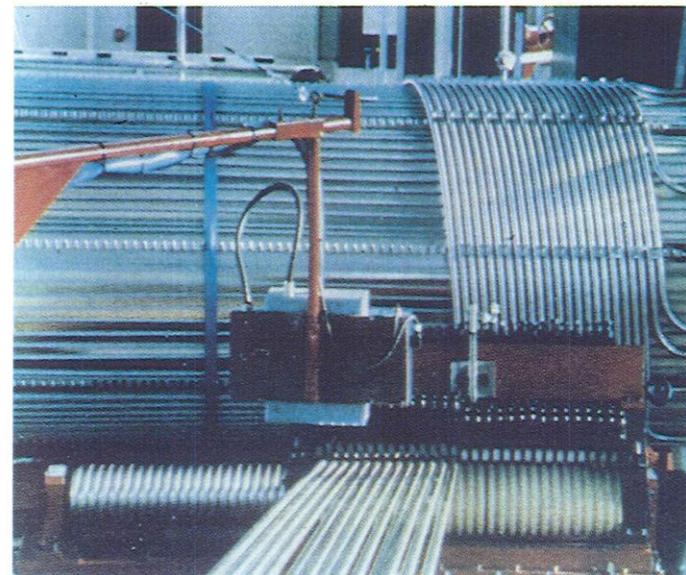
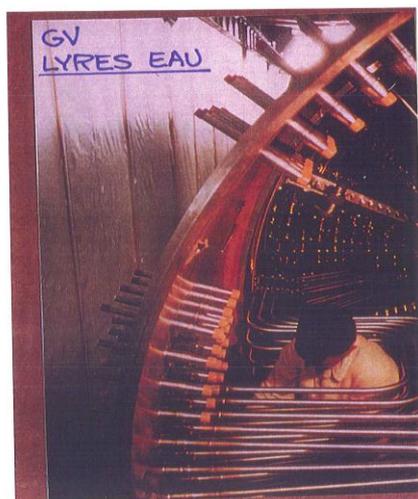
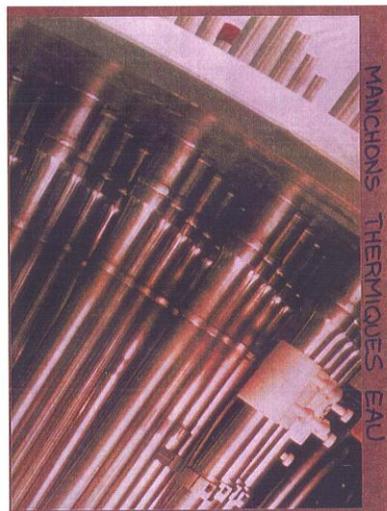
<b>Nombre de tubes</b>	<b>357/GV</b>
Faisceau tubulaire	hélicoïdal
Diamètre extérieur des tubes	25 mm
Épaisseur des tubes	2,5 mm
Matériau du tube	Alliage 800

# Examen non destructif des tubes des générateurs de vapeur de Superphénix



- ▶ Plusieurs particularités défavorables:
  - Présence de diaphragme à l'entrée,
  - Présence de 2 manchons thermiques,
  - Présence de 7 soudures bout à bout avec bourrelet interne
  - Présence de 6 coudes à 90° dits 5D (rayon de courbure = 5 x diamètre).
- ▶ Ces particularités réduisent fortement le passage de sondes à courants de Foucault à l'intérieur des tubes.
- ▶ De plus, pour éviter de vidanger les GV, l'examen non destructif doit être réalisé avec présence de sodium à 150° C environ.

# Examen non destructif des tubes des générateurs de vapeur de Superphénix



**Creusot-Loire : Générateur de vapeur - Bobinage sur le corps central de la première nappe de tubes.**

*Cette nappe comporte 13 tubes. Elle est bobinée dans le sens extrémité entrée d'eau vers extrémité sortie de vapeur.*

# Examen non destructif des tubes des générateurs de vapeur de Superphénix

- ▶ Pour pallier les faibles performances des sondes magnétiques, le CEA a développé un capteur à ultrasons « multiéléments à focalisation dynamique » permettant l'examen précis sans avoir à faire tourner la sonde sur elle-même (risque de torsion du câble).
- ▶ Le capteur innovant a été testé sur maquette en 1993, puis développé de manière semi-industrielle par Framatome en 1994 avec l'objectif d'un test en vraie grandeur sur 5 tubes d'un GV lors de l'arrêt prévu en 1997.
- ▶ Finalement, l'examen par ultrasons a été mis en œuvre, à Superphenix, sur 23 tubes (exigence d'examen de 36 tubes) entre septembre 1997 et janvier 1998; de grandes difficultés ont été rencontrées (ovalisation) et l'examen des tubes a été arrêté sans analyse finalisée.

# Inspection en service de la cuve principale du réacteur

- ▶ Exigence formulée par l'Autorité de Sûreté nucléaire le 04/01/1988 en préalable au redémarrage de Superphénix
- ▶ Exigence d'examen de:
  - la soudure du point triple (39 m),
  - La soudure circulaire située à l'altitude 12792 mm
  - 2 soudures méridiennes
- ▶ Rechercher les indications notées par radiographie lors de la fabrication de la cuve principale (CP); 7 indications sur 8

# Inspection en service de la cuve principale du réacteur

- ▶ L'inspection s'est déroulée du 13 juin 1988 au 27 août 1988
- ▶ Elle est préparée et réalisée le CEA et surveillée par EDF
- ▶ Elle met en œuvre le **Module d'Inspection des Réacteurs rapides (MIR)**, engin développé par le CEA/STA.
- ▶ Le MIR permet d'effectuer des examens par ultrasons des soudures de la cuve principale et un examen télévisuel.

# Inspection en service de la cuve principale du réacteur

## ► Les conditions sont difficiles:

- Accès par des trappes en partie supérieure (nombre limité),
- Descente dans l'espace inter-cuve entre la cuve de sécurité et la cuve principale,
- La distance inter-cuve n'est pas tout à fait constante,
- La température de l'espace inter-cuve est de 160° C minimum et l'atmosphère est de l'azote

## ► Le MIR est relié à :

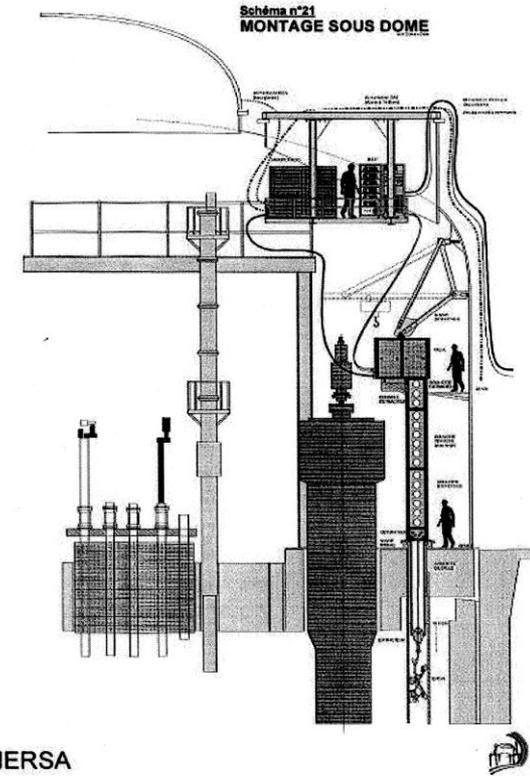
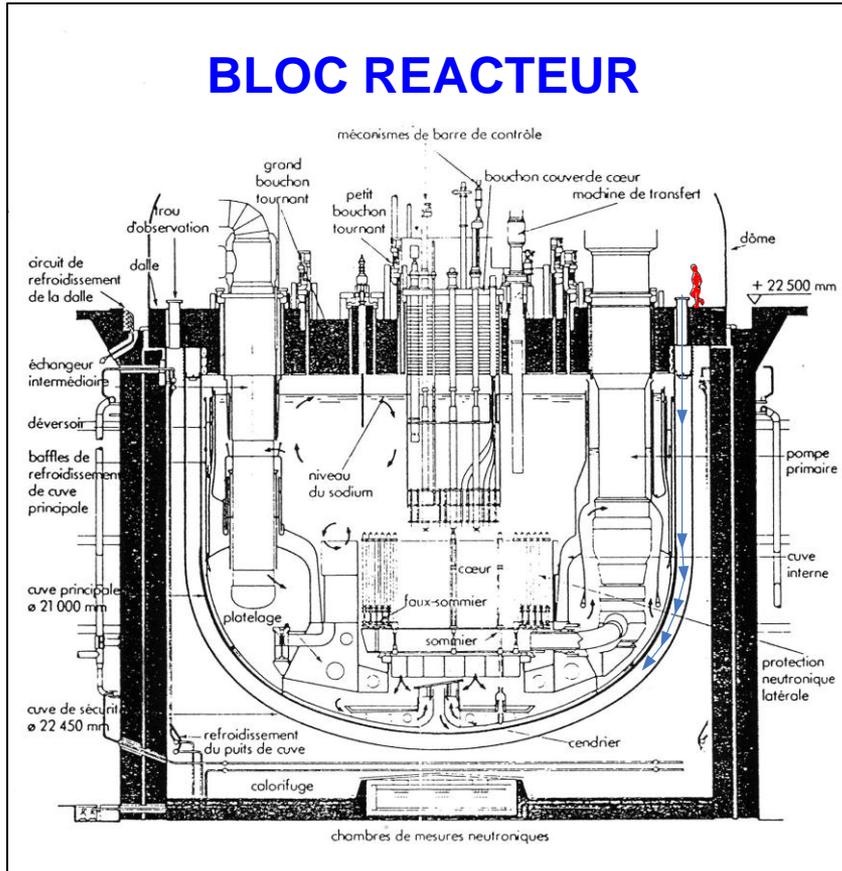
- un câble avec stoppe-chute,
- un cordon ombilical qui permet l'envoi et la réception des ordres de mouvement, la gestion de l'électronique embarquée, notamment celles des caméras de navigation et d'inspection, le mouvement des capteurs ultrasonores, l'acquisition des données ultrasonores, ...
- Compte tenu de la température, l'examen par ultrasons n'est pas fait sous eau mais en utilisant un couplant spécial le Gilotherm (hydrocarbure) dont la propriété principale est la transmission des ondes ultrasonores jusqu'à 250° C sans variations.

# Cuve de sécurité de Superphenix



Cuve de securite

# Bloc réacteur SUPERPHENIX

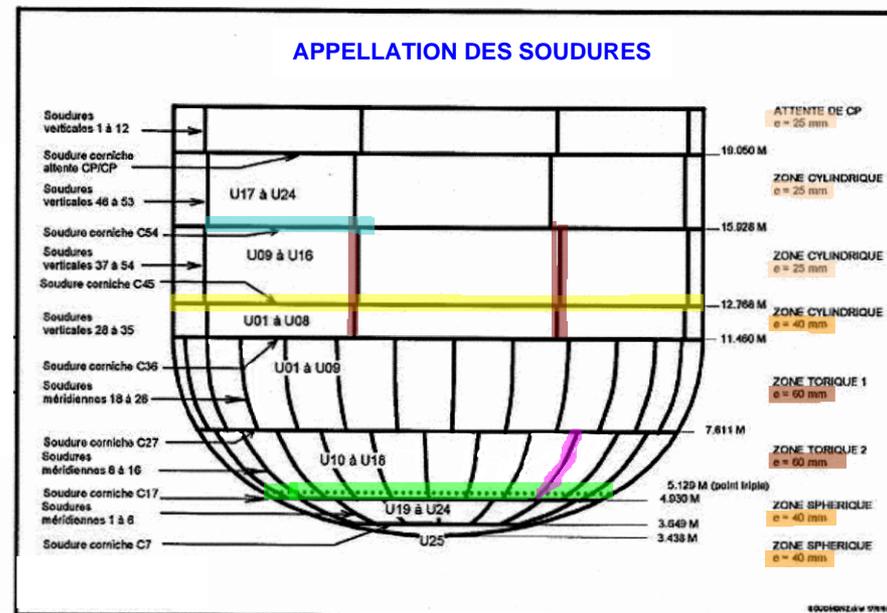


Introduction de l'engin MIR dans l'espace intercaves

# Inspection de la cuve principale du réacteur

► L'inspection demandée doit porter sur:

- Des soudures de corniche horizontales,
- L'ensemble du point triple qui relie la cuve principale au platelage, en bas de la cuve,
- Des soudures verticales (partie cylindrique)
- Des soudures méridiennes (partie torique inférieure)



# Cuve principale de SUPERPHENIX

## ► Matériau de la cuve:

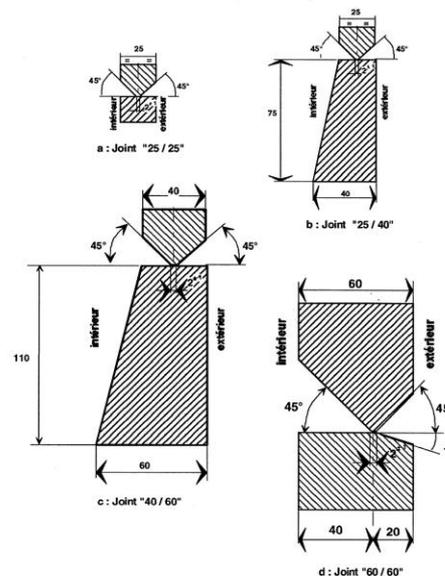
- Acier inoxydable, nuance 316 L SPH dit à « azote contrôlé »

## ► Joints soudés de 2 types:

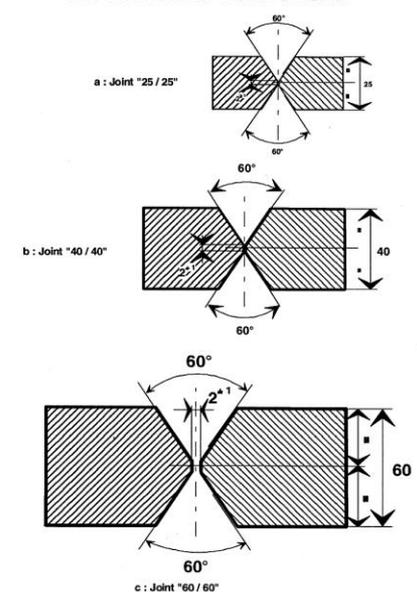
- Dits en X pour les soudures « méridiennes », épaisseurs 25 mm, 40 mm et 60 mm,
- Dits en K pour les soudures parallèles, épaisseurs 25 mm, 25/40 mm, 40/60 mm, 60 mm.

Profil des soudures bord à bord

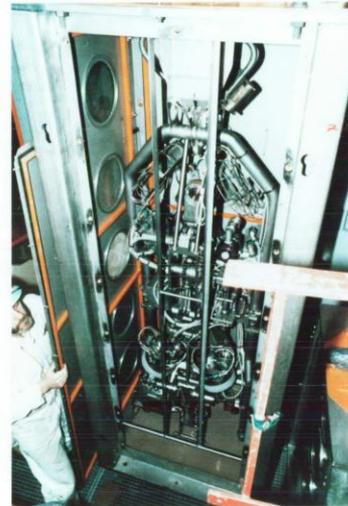
PROFIL DES JOINTS PARALLELES SUR LES SOUDURES "BORD à BORD"



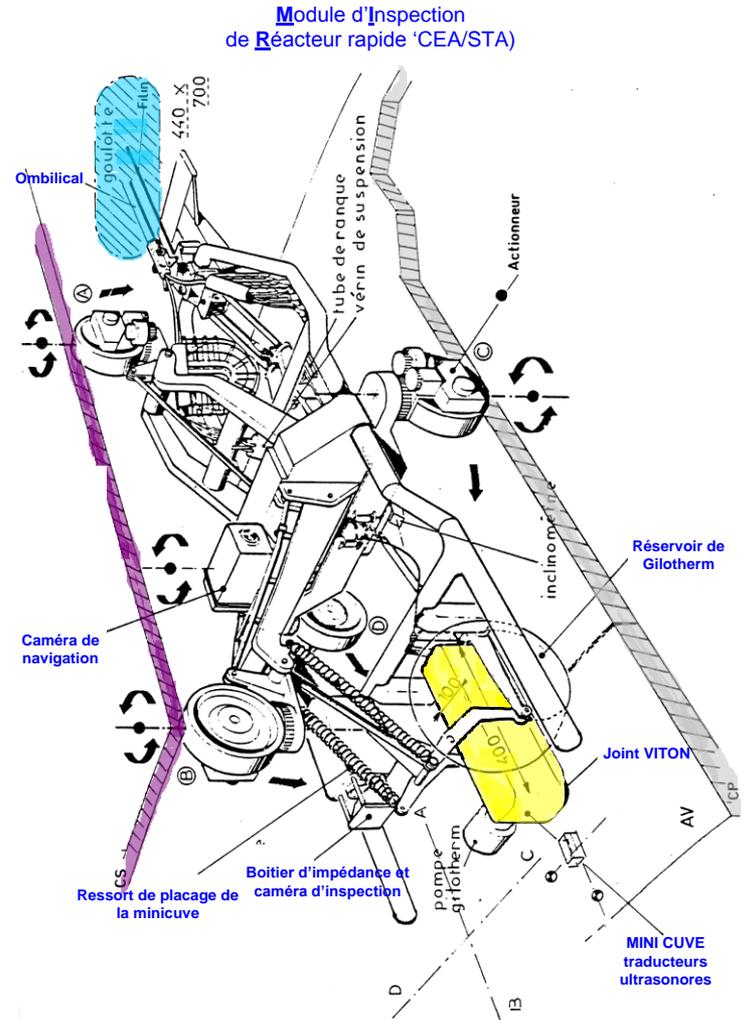
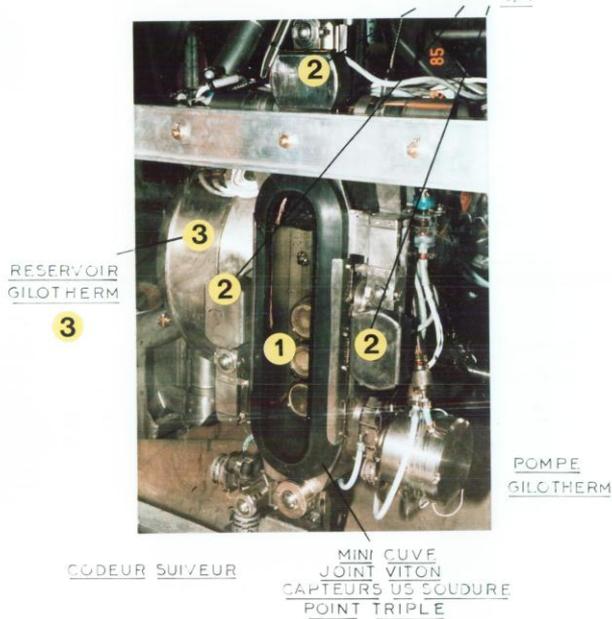
PROFIL DES JOINTS MERIDIENS SUR LES SOUDURES "BORD à BORD"



# Module d'Inspection des Réacteurs rapides



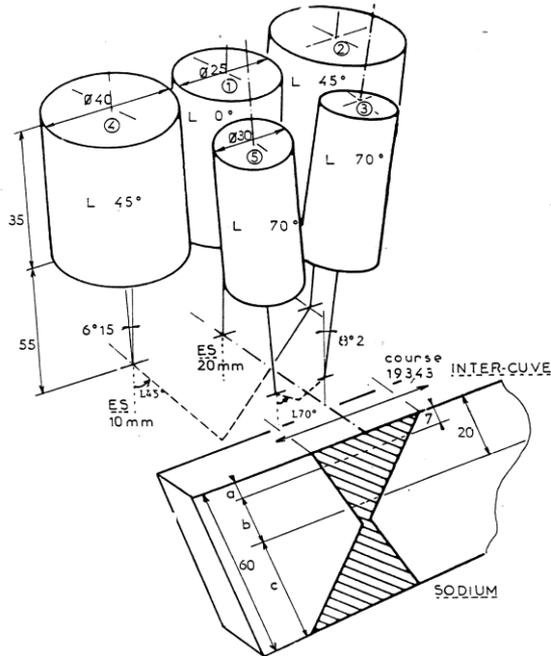
ENGIN DANS SA GOULOTTE VEHICULE



# Module d'Inspection des Réacteurs rapides

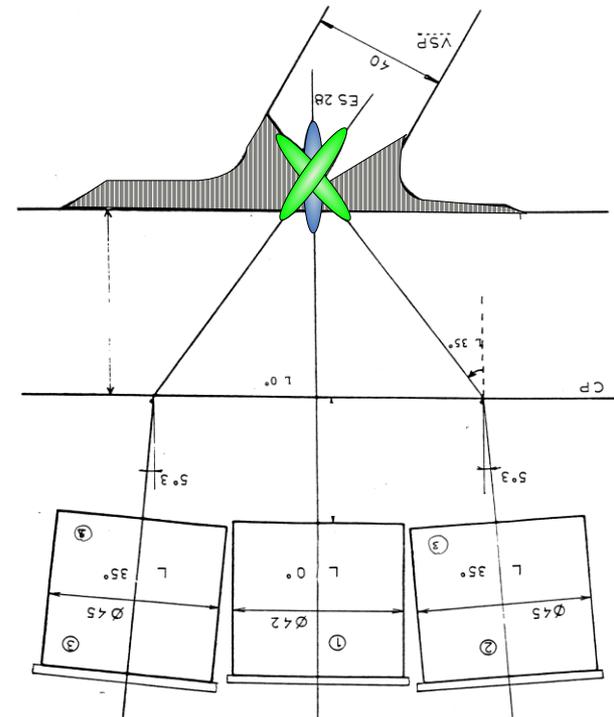
## Examen des soudures parallèles et méridiennes

Transducteurs ultrasonores focalisés  
Piézoélectrique en Titanate Zirconate de Pb, lentille avant et amortisseur arrière  
en alliage Fe-Ni fritté.



## Examen du point triple

TRADUCTEURS ULTRASONORES D'EXAMEN DU POINT TRIPLE



# Résultats de l'inspection

- ▶ Le MIR a été introduit dans l'espace inter-cuve à partir de 8 des traversées de la dalle supérieure,
  
- ▶ Il a parcouru au total 904 m et a inspecté par ultrasons:
  - 80,5 m de soudures de corniche
  - 11 m de soudures verticales,
  - 13,5 m de soudures méridiennes,
  - 37 m de soudures du point triple (sur 39 m)
  
- ▶ Il a été détecté et caractérisé par ultrasons:
  - 2 indications dans les soudures de corniche, verticales et méridiennes
  - 24 indications dans le point triple (18 avaient été décelées en fabrication en 1979)
  - Aucune des 7 indications radiographiques « hors critères » n'a été retrouvée.

# Difficultés rencontrées

- ▶ La disposition des cuves, le nombre de soudures, les transitions d'épaisseur, l'introduction par des trappes, rendent difficiles l'examen par ultrasons et par caméra vidéo.
- ▶ Parmi les points plus délicats,
  - le désaccostage de certaines tôles (supérieur ou égal à 2 mm) a interdit l'examen sous peine de risquer la déchirure du joint et la perte du liquide de couplage.
  - Le bruit de fond ultrasonore dans le point triple qui pénalise l'interprétation des données ultrasonores,
  - L'effet de la température, et la variation de l'espace inter-cuve même faible dans l'absolu mais qui interdit d'envoyer un robot au-delà d'une certaine limite.