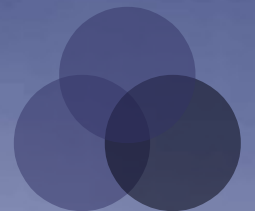


Le silicium dans les détecteurs à venir

Plan

- Historique
- Les détecteurs
- ILC, CLIC
- Au labo

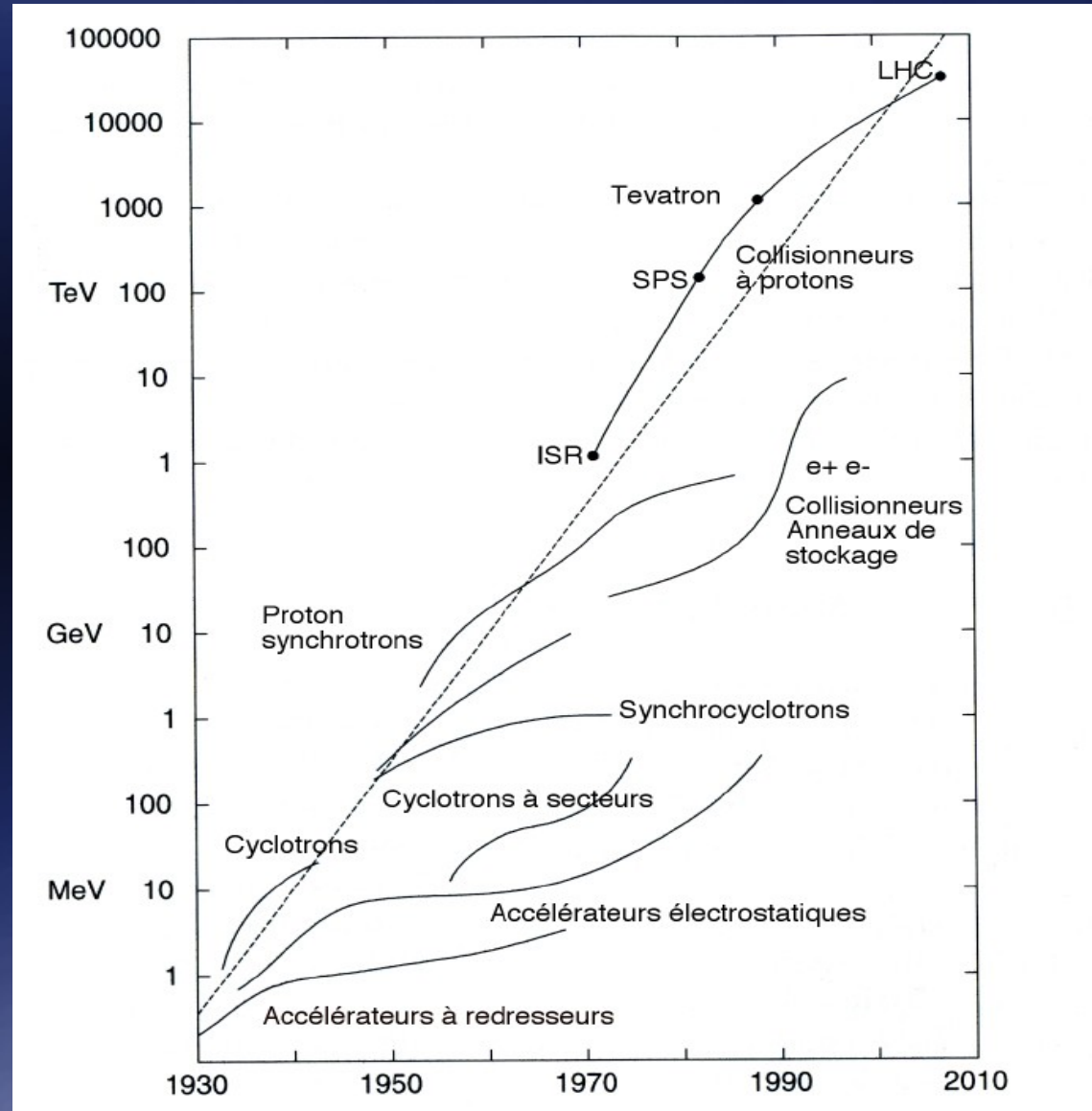


Historique

Augmentation d'un facteur
10 tous les 7-8 ans

Si l'évolution s'était
maintenue, on aurait atteint
60 TeV dès 2005

On constate un net
fléchissement des
performances qui indique
peut-être un premier signe
de fatigue de la discipline



Les accélérateurs

- électrons contre positrons. Exemples : le SLAC ; le LEP.
- hadrons contre hadrons (protons contre protons, protons contre antiprotons). Exemples : le SPS ; le Tevatron ; le LHC.
- électrons contre protons. Le seul et unique exemple fut HERA .

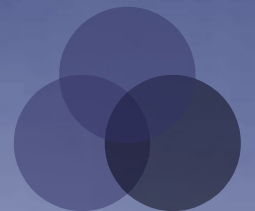


L'alternance

nom	Énergie centre de masse	Année mise en service	Type de particules
PS	25 GeV	1959	proton
SLAC Linac	50 GeV	1966	e ⁺ / e ⁻
SPS	450 GeV	1976	Proton/antiproton
LEP	104 GeV	1989	e ⁺ /e ⁻
LHC	7 TeV	2010	proton
ILC / CLIC	1 TeV / 3 TeV	?	e ⁺ /e ⁻

Où l'on voit que les accélérateurs se divisent en 2 (grandes) catégories :

- Les accélérateurs à protons, à forte énergie, qui explorent
- Les accélérateurs à électrons, qui mesurent finement



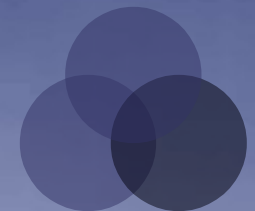
Après LHC

- Le LHC devrait découvrir (ou pas) le Higg, ou autre
- Il faudra donc faire des mesures fines sur ces découvertes (?)
- D'où un accélérateur à électrons (leptons)

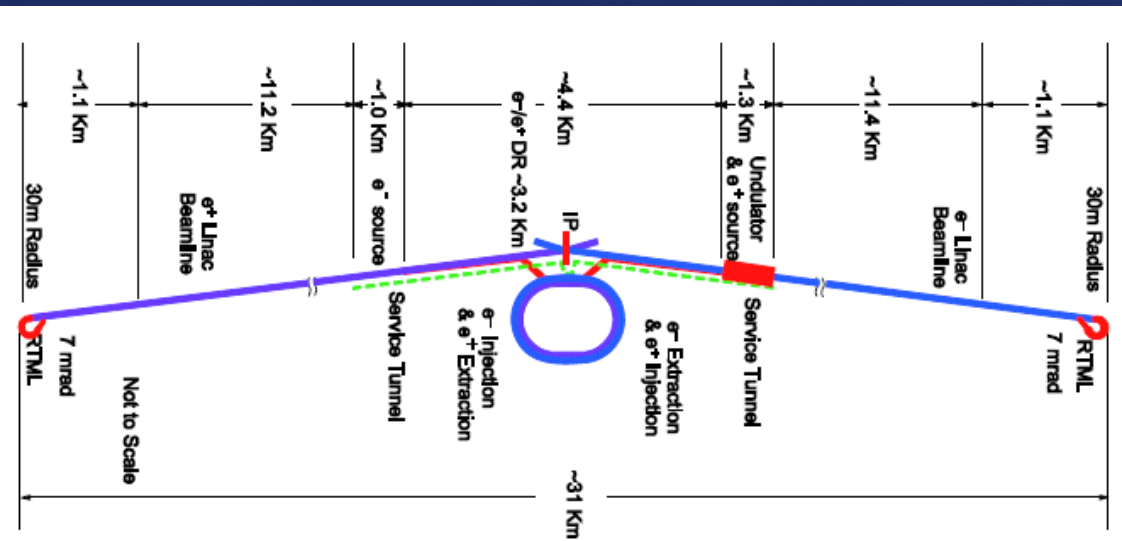


Spécificités

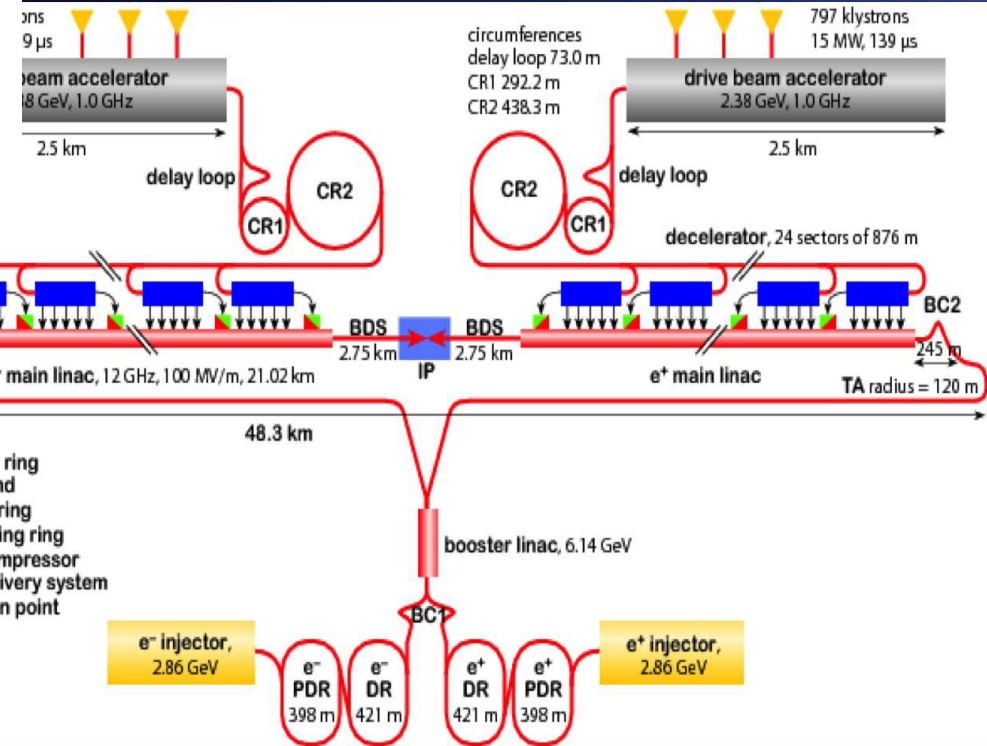
- **Cet accélérateur doit être linéaire**
- http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Charges/linac.html#manip
 - Pour éviter le rayonnement synchrotron
 - Il va produire des « jets », qui rendront l'identification des particules malaisée
 - Il lui faut donc un très bon détecteur de traces, et un calorimètre à fine granularité
- **Le projet actuellement le plus avancé est le ILC**
- **Il y a donc deux projets de détecteurs, dans ILC**
 - SiD → Silicium detector (tout silicium)
 - ILD → trajectomètre Si + TPC, calorimètre sans doute à Si tungstène



Les accélérateurs



ILC

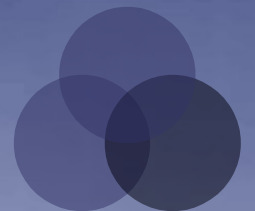


CLIC

ILC ou/(et?) CLIC ?

	ILC	CLIC
Énergie	500 GeV → 1 TeV	3 TeV
Longueur	30 km	50 km
Fréquence des trains	5 Hz	200 Hz
Temps entre croisements	337 ns (2812)	0,67 ns (154)

On comprend mieux la difficulté d'un détecteur de CLIC : comment étiqueter convenablement un événement à (beaucoup) mieux que 667 ps ?



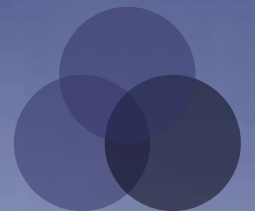
Le silicium

Dans tous les cas de figures, le détecteur le plus envisagé est le silicium

Environ mille fois plus denses que les détecteurs gazeux classiques, les détecteurs silicium à micropistes sont néanmoins d'excellents candidats pour la détection des particules de haute énergie. S'il faut environ 30 eV dans un gaz pour créer une paire électron-ion, environ 3 eV sont suffisants pour créer une paire électron-trou dans un semi-conducteur ce qui permet d'obtenir de très bon rapport signal sur bruit pour une faible tension d'alimentation (quelques centaines de volts).

D'autre part, l'excellente résolution spatiale de ces détecteurs, de l'ordre de quelques dizaines de micromètres, est associée à un temps de réponse rapide proche d'une dizaine de nanosecondes.

Le silicium a aussi l'avantage d'avoir une faible masse atomique, ce qui minimise la contribution à la diffusion multiple avant le calorimètre, ainsi que d'excellentes propriétés mécaniques et une grande pureté possible.



Le silicium (suite)

A titre comparatif, le tableau fournit les critères de l'utilisation de silicium dans le détecteur CMS et dans d'autres détecteurs de la physique des particules.

expérience	Nb de capteurs	Nb de canaux	Surface de Si (en m ²)
CMS	16000	10*10 ⁶	223
ATLAS	16000/2	6,15*10 ⁶	60
CDF II	720	405 000	1,9
Aleph	144	95 000	0,49
L3	96	86 000	0,23

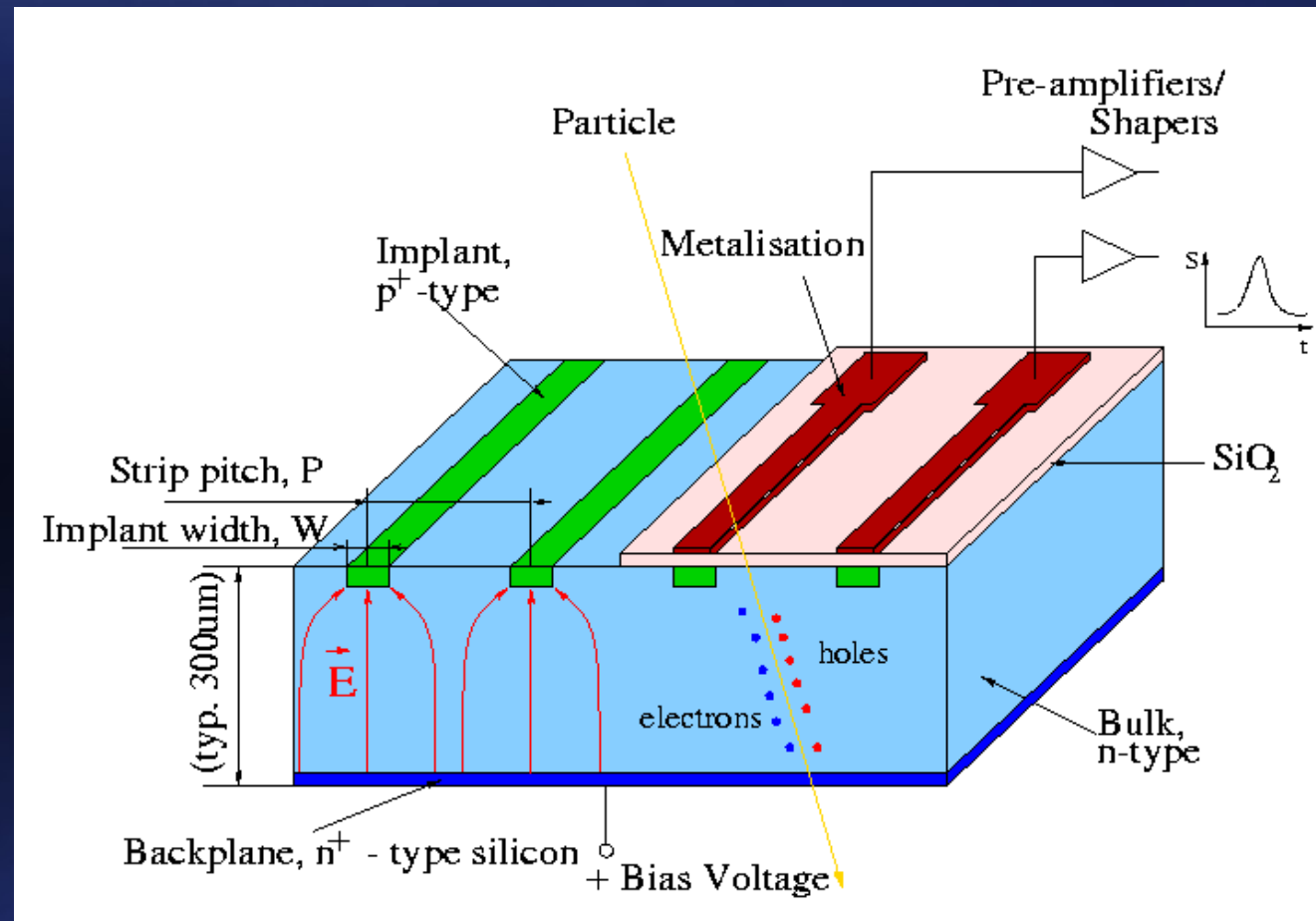
Si l'on ajoute à toutes ces qualités la possibilité d'y incorporer l'électronique, on se demande comment a t'on pu faire de la physique sans les capteurs Silicium.



Principe (rappel)

Lorsqu'une particule (au minimum d'ionisation) traverse le détecteur silicium à micropistes, elle perd de l'énergie par ionisation et crée au maximum 72 paires électrons-trous par micromètre le long de sa trajectoire, soit 22 000 paires électrons-trous pour un substrat de $300\mu\text{m}$. Sous l'action d'un champ électrique intense (de quelques kV/cm), les charges dérivent en quelques dizaines de nanosecondes vers la face arrière du substrat (zone n^+ sur la figure) et les pistes (zone p^+ sur la figure). C'est le déplacement de ces charges qui va induire un courant sur les pistes reliées à l'électronique de lecture.

Par ailleurs, un faible courant de fuite apparaît, principalement suite à la génération thermique de paires électrons-trous et contribue au bruit du détecteur.



Les détecteurs sur ILC (validés)

- En commun :

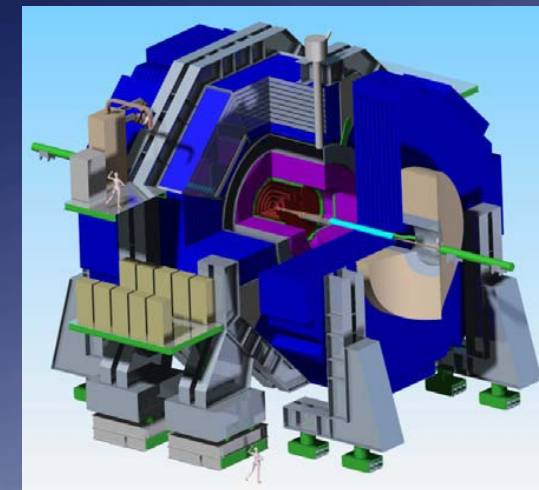
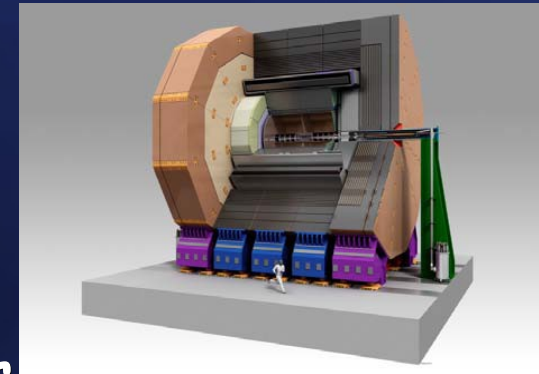
- Détecteur de vertex fin
- Calorimètre électromagnétique à Si

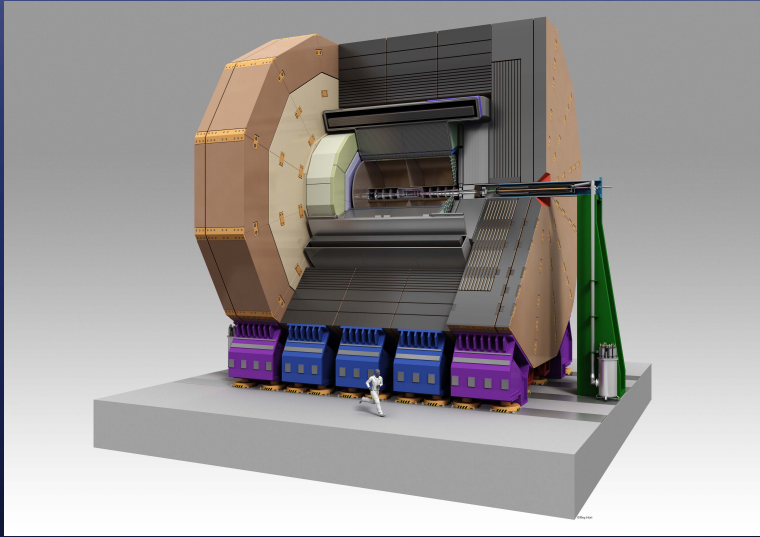
- ILD

- Trajectomètre : TPC + Si
- Calorimètre hadronique = fer/scintillateur

- SiD

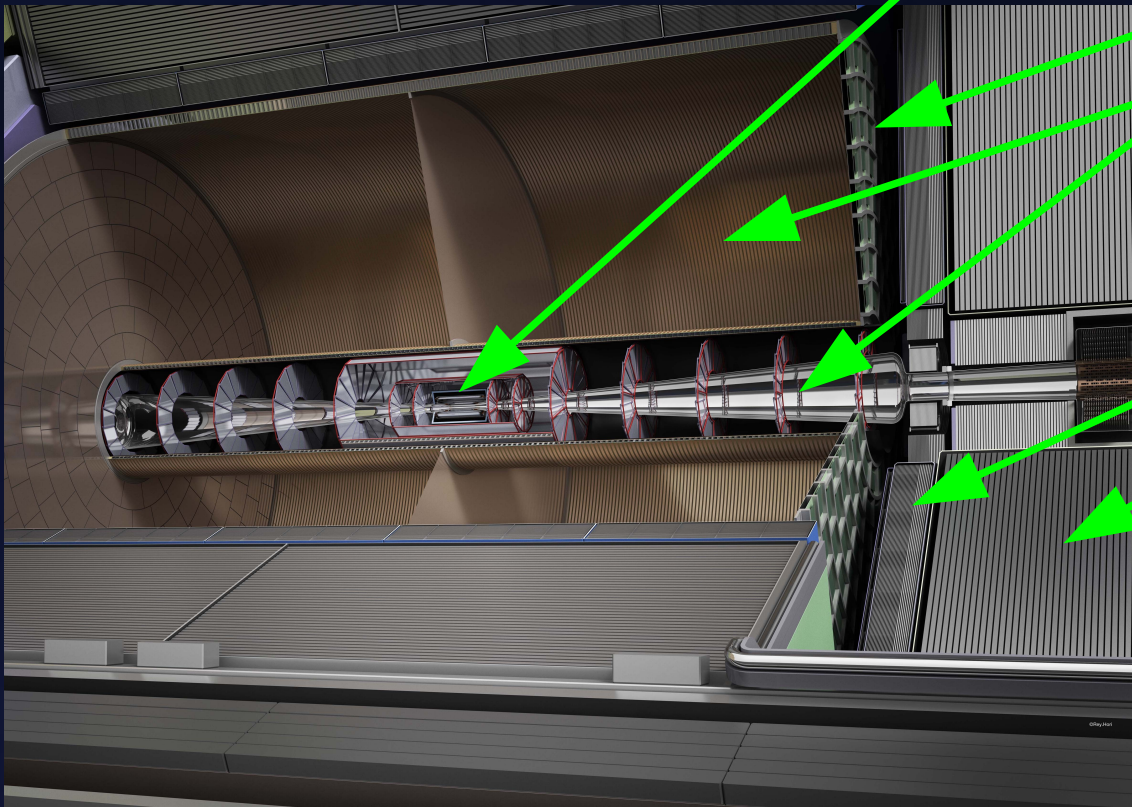
- Trajectomètre tout Si
- Calorimètre hadronique : RPC rapides
- Axé sur la rapidité de réponse





Le détecteur ILD

- Le détecteur de vertex.
- Les détecteurs de traces



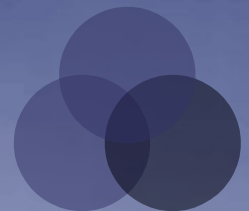
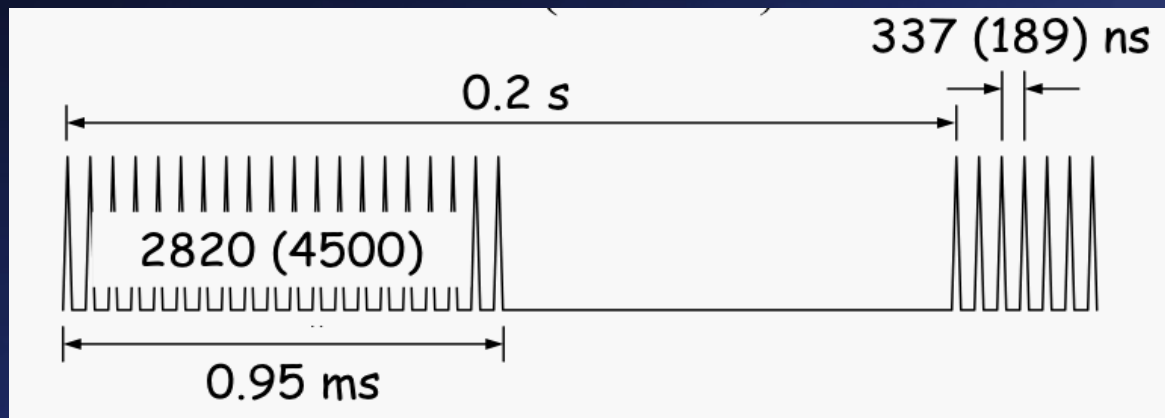
- Le silicium
- La TPC
- Les calorimètres
- Électro-magnétiques
- Hadronique

- Le labo est impliqué dans :
- 2001-2010 → détecteur de traces au Silicium « SiLC »
- 2011 → ? Calorimètre électromagnétique « Calice »

2001 - 2010

motivations et spécifications

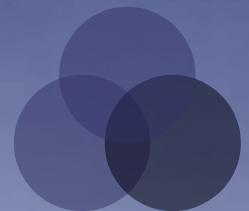
- Le but était de faire un détecteur le plus fin possible, consommant peu pour éviter le refroidissement forcé, et le plus intégré possible
- En effet, le ILC est une machine pulsée, avec un rapport de forme de 1 à 200. Cela autorise la numérisation différée et la mise en veille



2001 - 2010

organisation

- L'équipe s'est donc déployée dans deux directions :
 - Étude et réalisation d'une puce (μ électronique)
 - Adaptation de l'électronique à un détecteur (banc de test, tests en faisceaux)



L'électronique

- L'idée est de construire un système complet sur une puce, comprenant :

- L'étalonnage

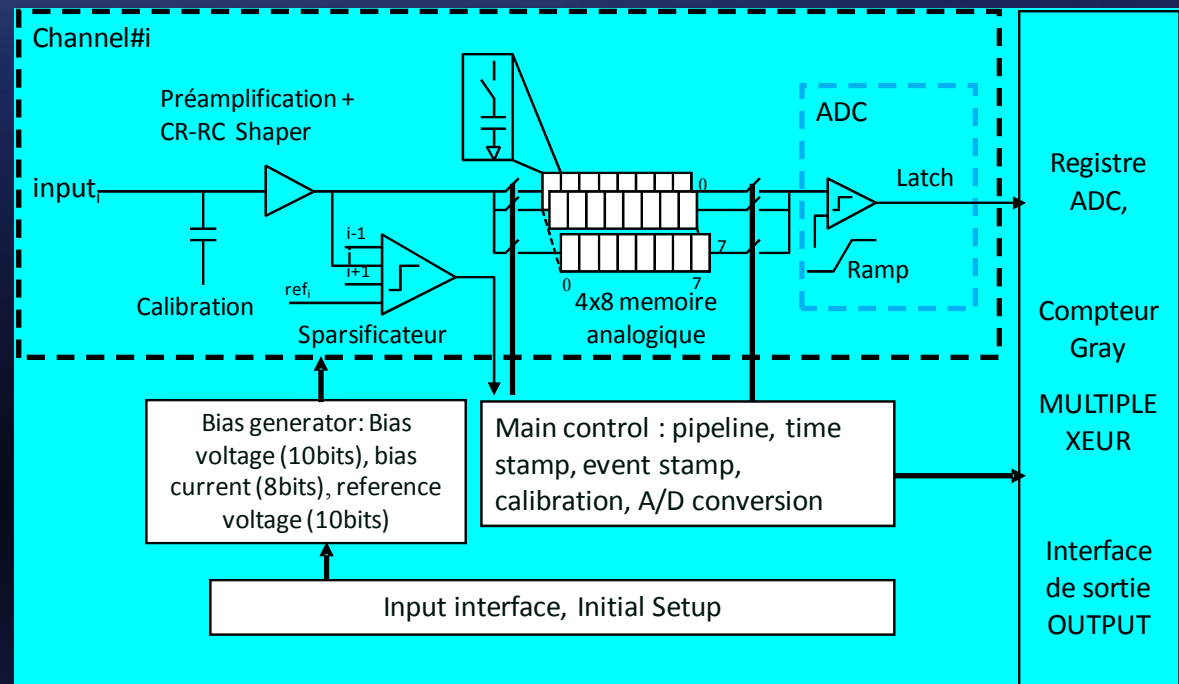
- Le « préampli-shaper »

- La mise en mémoire (analogique)

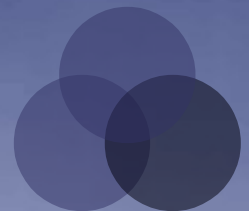
- Le déclenchement

- La numérisation

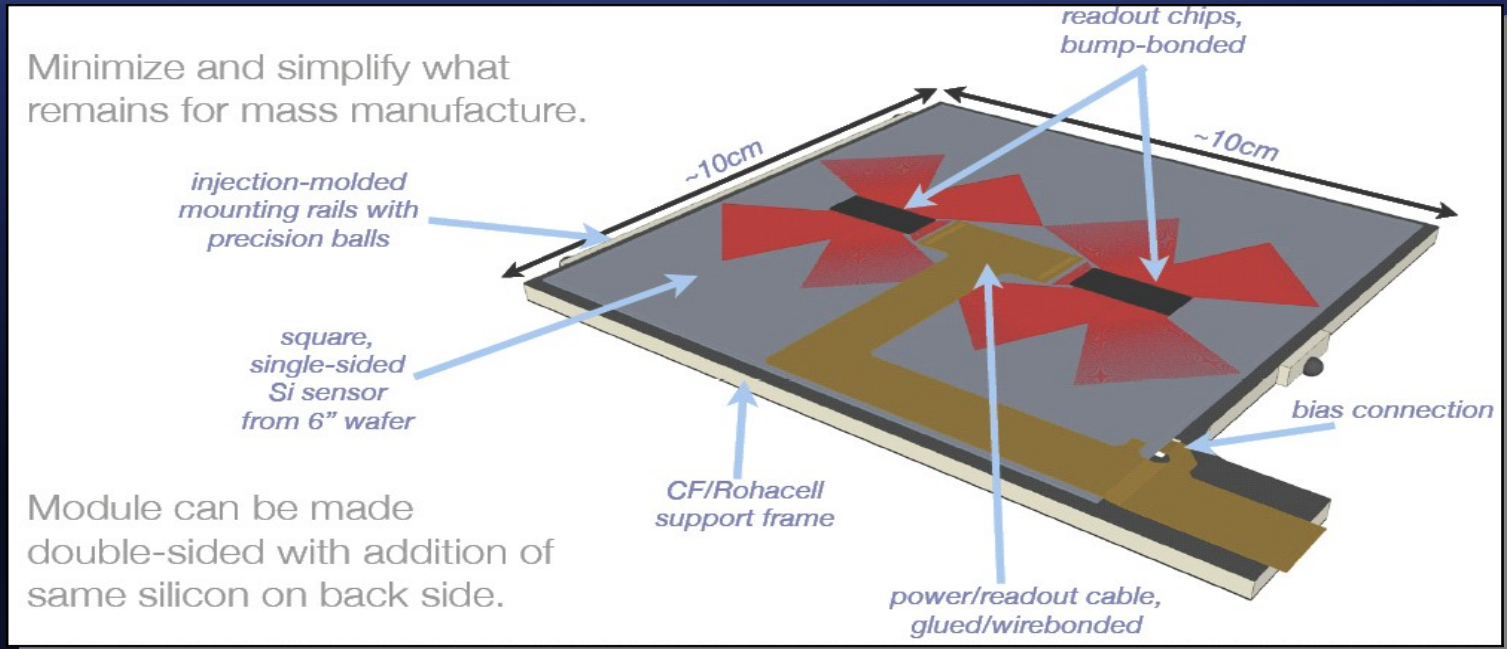
- L'étiquetage et la sortie des données en série, ainsi que le passage des paramètres de configuration



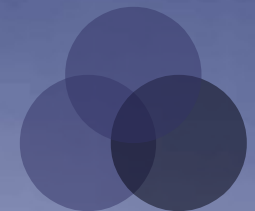
Le but à atteindre est l'implantation de cette puce directement sur le détecteur Si, d'abord par « bonding », puis par « bump-bonding » (Ball Grid Array)



Un exemple (américain)



Un groupe américain table sur un chip à 1024 voies (50 μm pour 10 cm \rightarrow 2000 voies)



Réalisations au labo

4 voies UMC 180 nm

- Juste les préampli-shaper

4 voies UMC 130 nm

- Avec mémoire analogique, CAN et « sparsificateur »

88 voies UMC 130 nm

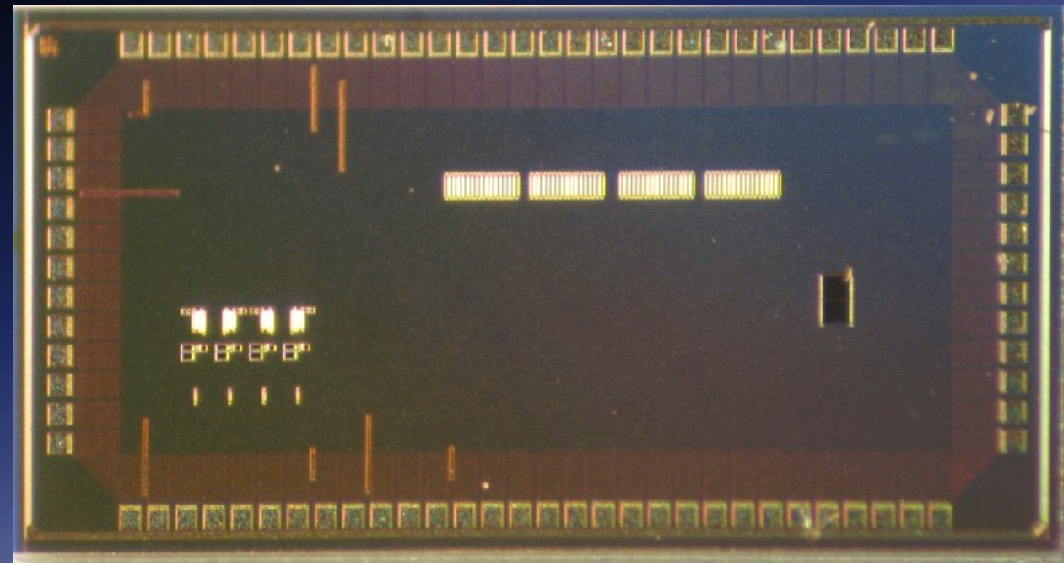
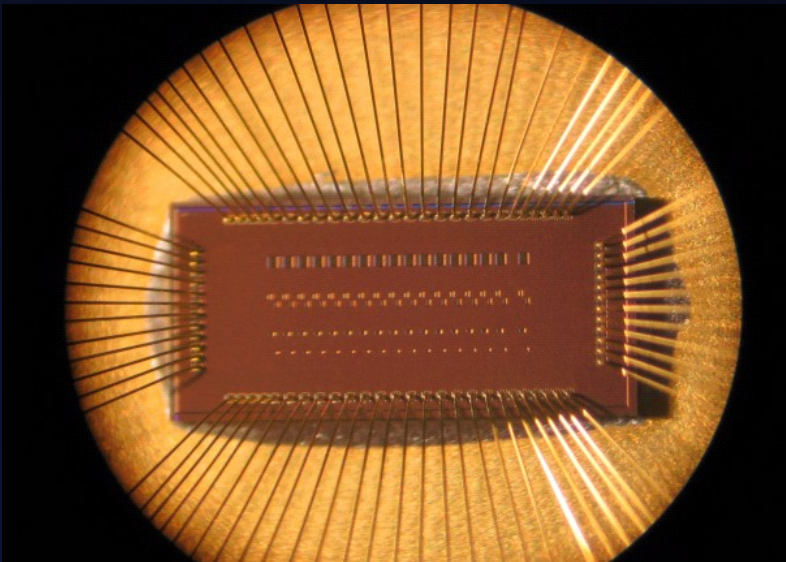
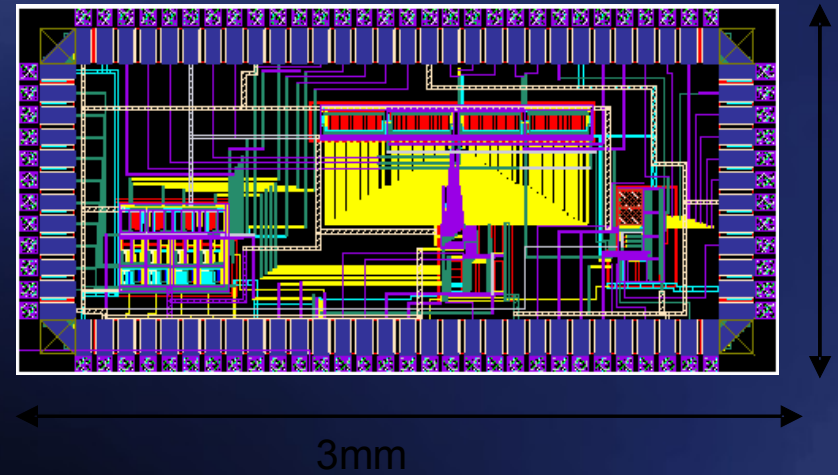
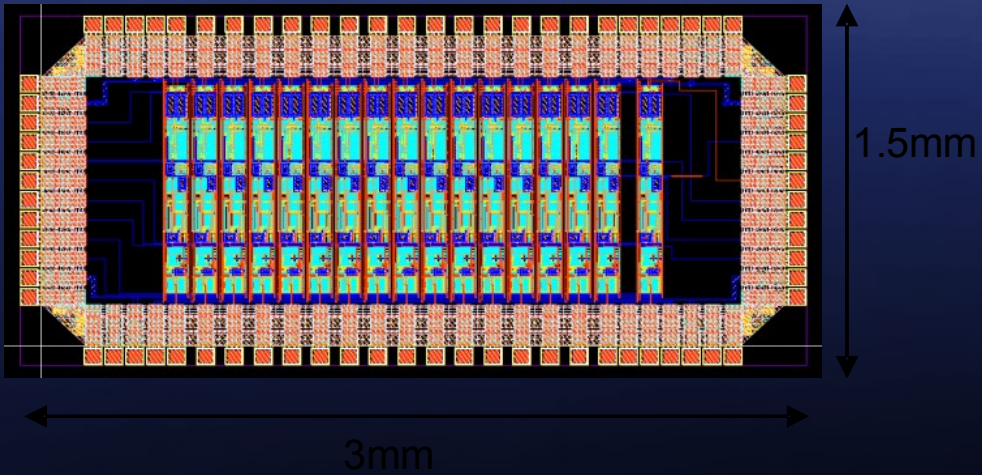
- Avec le système complet

Blocs préampli IBM 130 nm

- Pour tester le comportement analogique de la technologie IBM



Les puces



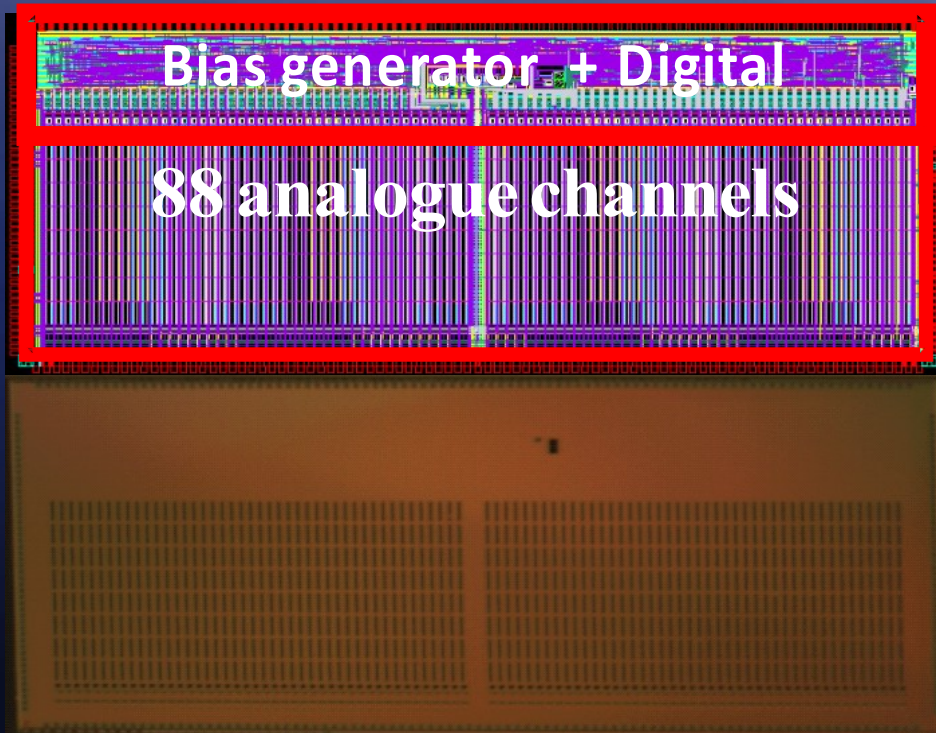
180nm chip layout and picture

130nm chip layout and picture

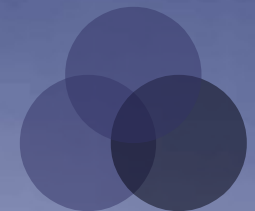
27/01/2012

Jacques DAVID

Le 88 voies

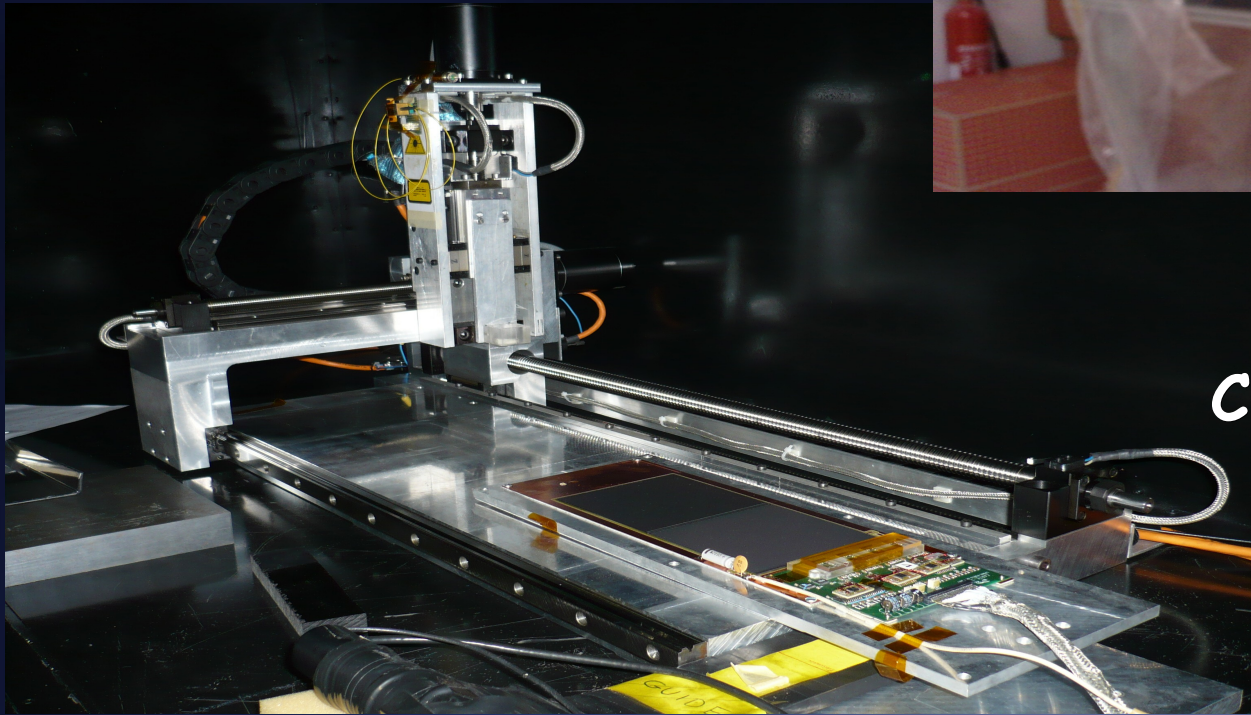


- La voie analogique consomme 1,2 mW, sans mise en veille (*power cycling*)

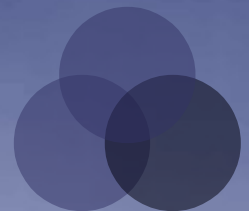


Le banc de test

Vous vous êtes peut-être demandé ce qu'était cette grosse boîte dans la salle électronique

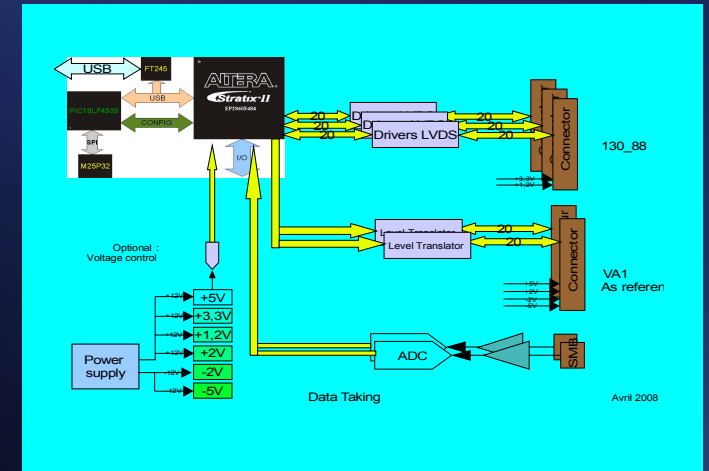


C'est ici que nous testons l'assemblage capteur Si-électronique.



Le système de test

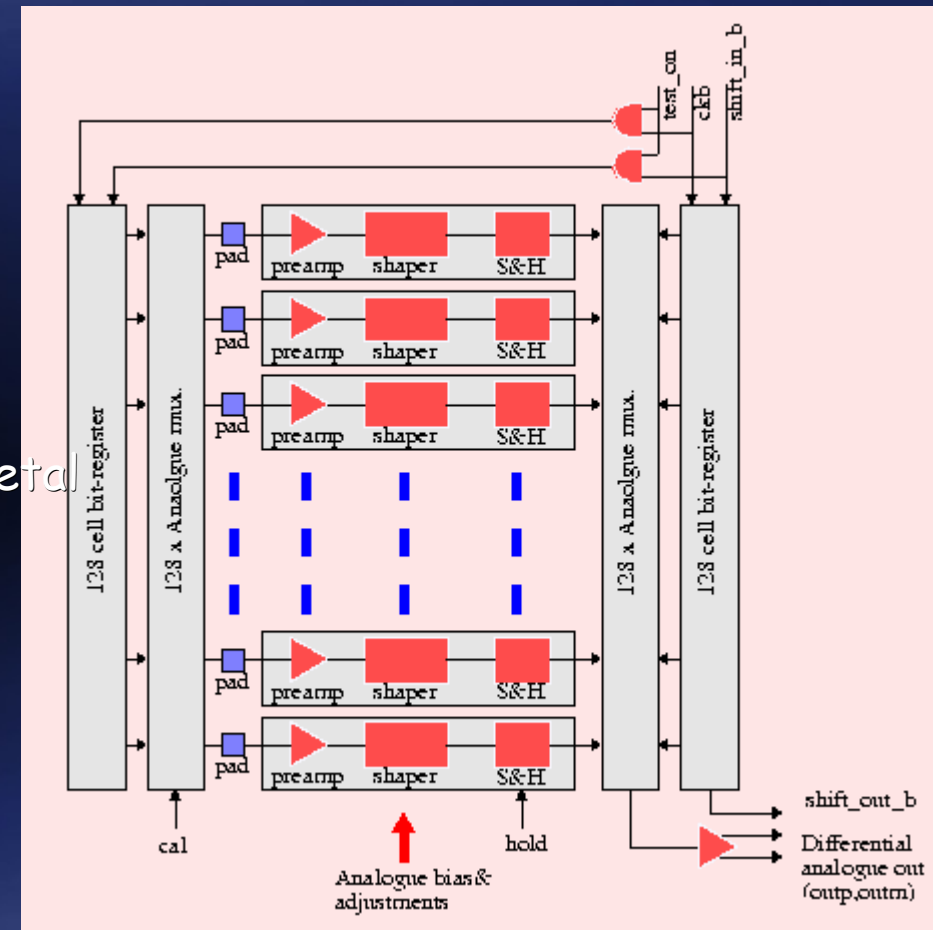
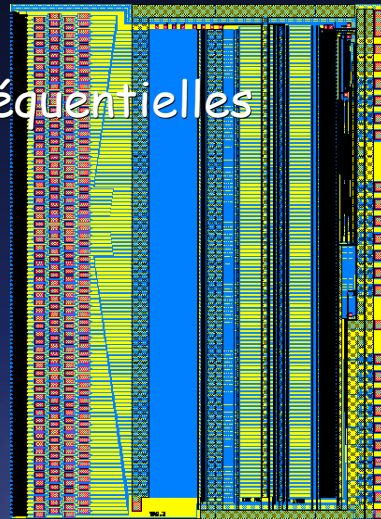
- Il a fallu construire et améliorer un système d'acquisition de données
- D'abord sous LabView
- Puis sous Linux avec Narval, puis Midas



L'électronique de lecture

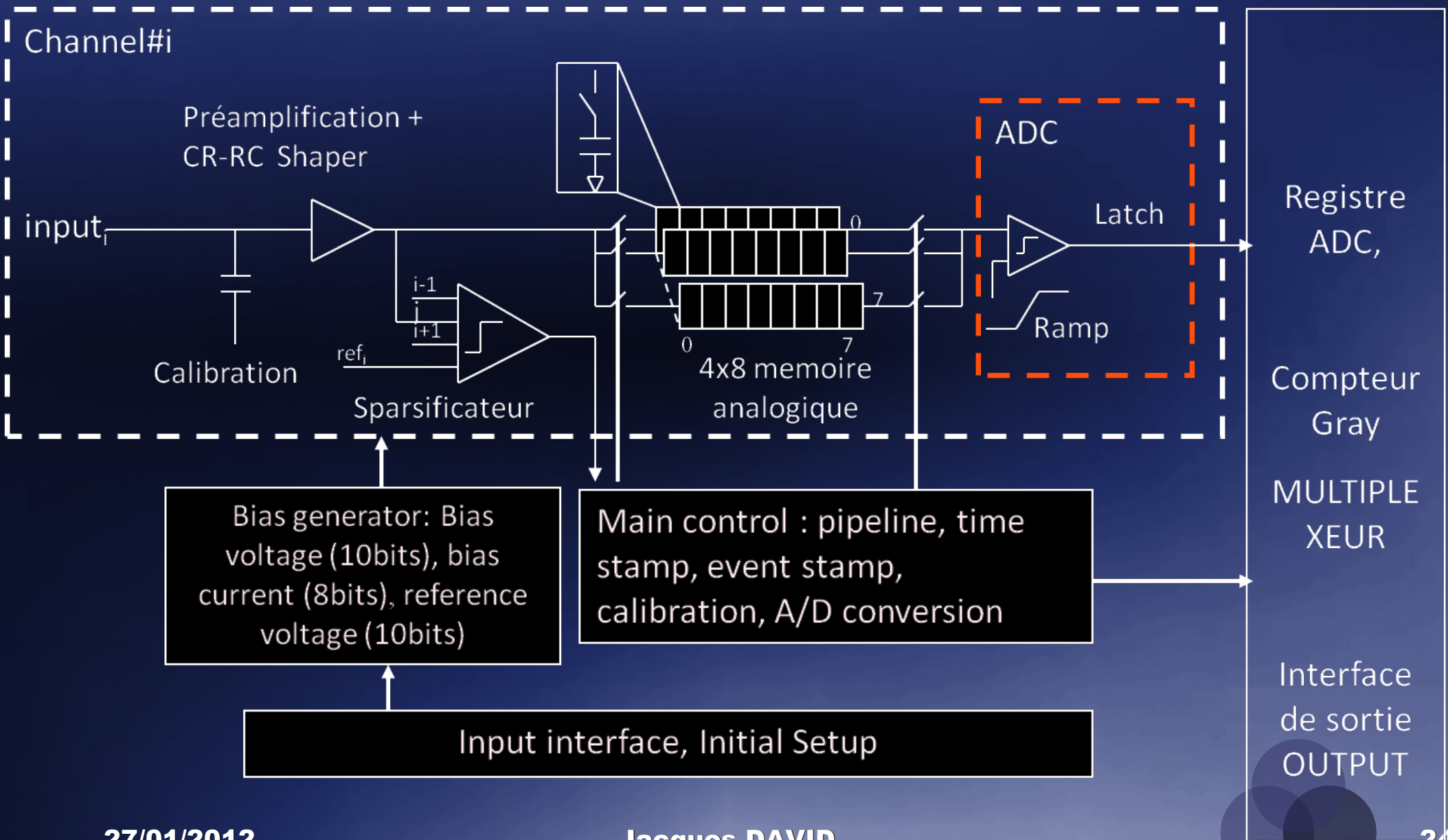
Les VA1' (™), comme référence

- Produit commercial
- 128 canaux au pas de 50 μm
- 0.8 μm N-well CMOS, double-poly, double métal
- Alimenté en +2V (12 mA), -2V (-75mA)
- Sorties analogiques, séquentielles



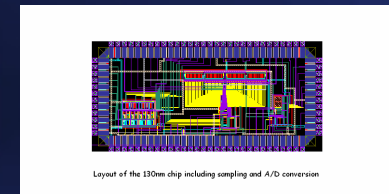
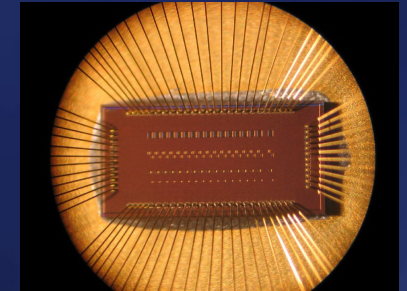
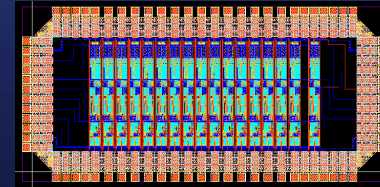
Celles du labo

SiTR

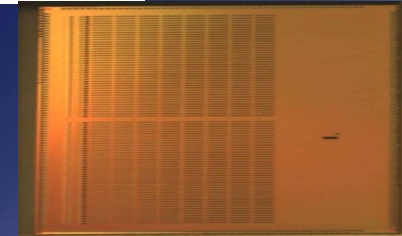


Les versions

- **SiTR_180-4 2005**
 - Pour tester, sortie analogique
 - Contient : préampli-shaper, cellule mémoire, comparateur
- **SiTR_130-4 nov 2006**
 - Avec CAN 12 bits et sparsifier
- **SiTR_130-88, reçus oct 2008**
 - Système complet, la partie numérique est HS
- **SiTR_130_Blocks, reçus jan 2011**
 - Pour tester la réponse en bruit de la techno IBM 130 nm

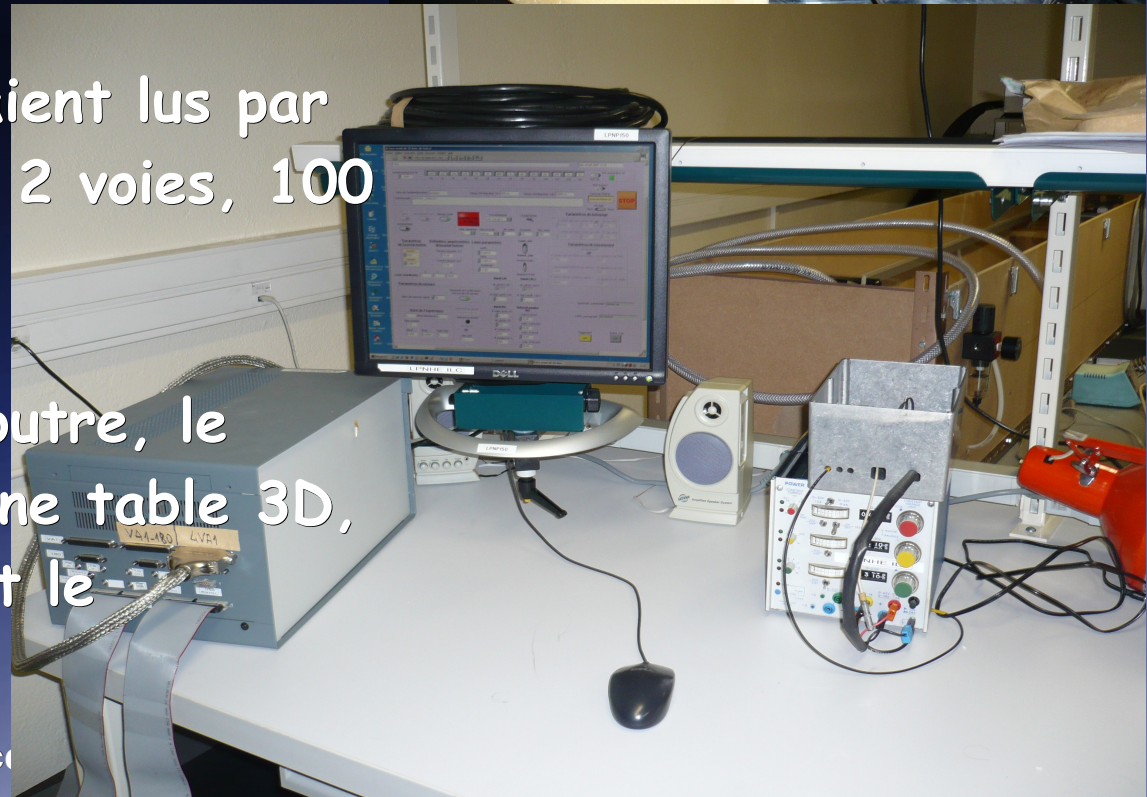
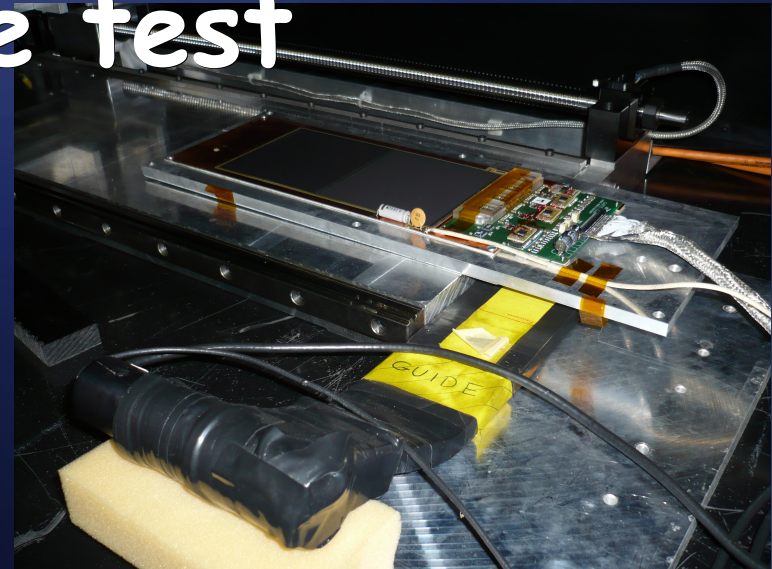


Layout of the 130nm chip including sampling and A/D conversion



• Les systèmes de test

- Les VA1 étant peu documentés, la première carte de test permettait, grâce à une carte Data I/O, de faire varier les paramètres des signaux de contrôle.
- Les signaux analogiques étaient lus par une carte oscilloscope PCI, 2 voies, 100 MHz, 14 bits
- Le LabView contrôlait, en outre, le déplacement du laser par une table 3D, la tension de polarisation et le générateur du laser.



• Les systèmes de test (suite)

- Puis, il a été décidé de construire un système de test plus ... portable
- Basé sur une carte FPGA USB, d'abord du commerce, puis construite par nos collègues de Barcelone.
 - Il lui faut :
 - Alimenter les cartes frontales
 - Envoyer les signaux de contrôle
 - Acquérir les données (CAN interne) et
 - Les envoyer au PC, par l'USB



Logiciels

- Pour gérer ces cartes USB, nous avons utilisé, sur les conseils (gratuits) du service informatique
- Narval, <http://narval.in2p3.fr/> développé à l'IPN d'Orsay
- Midas *Analyse de Données Micro-ondes pour machines pétaflopiques* http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/Recherche/Adamis/MIDAS09/index_french.html



Mécanique

- L'équipe mécanique nous a concocté une magnifique cage de Faraday, en sandwich de fibre de carbone, ainsi que des supports de capteurs

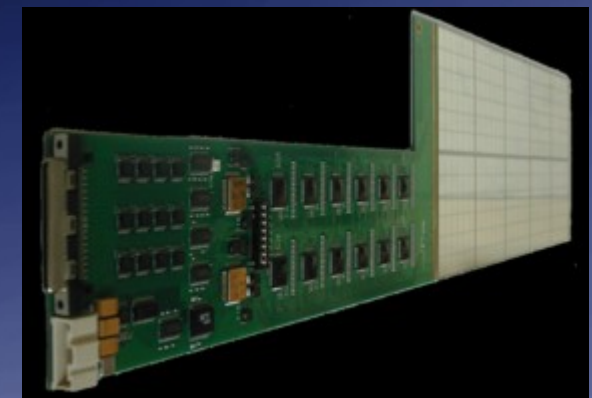
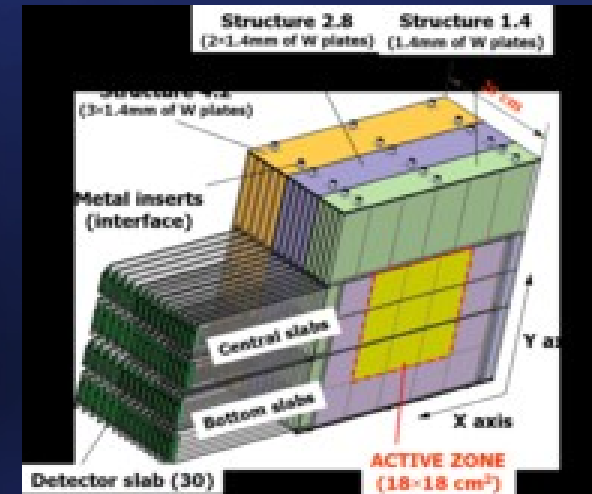
10.11.2010

CALICE ILD



C'est un calorimètre
électromagnétique

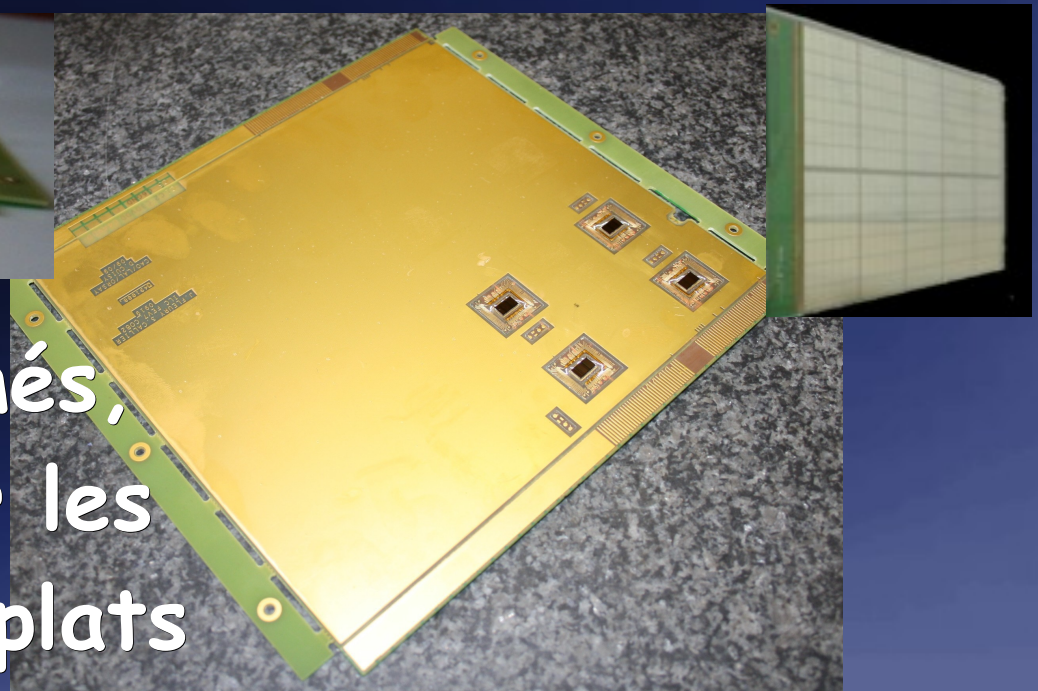
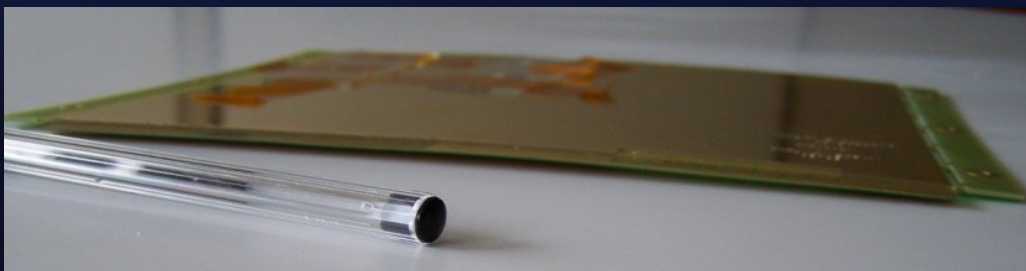
- Il est composé de fines lamelles de sandwichs tungstène, circuits imprimés portant les capteurs silicium



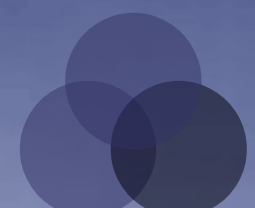
Le LPNHE dans



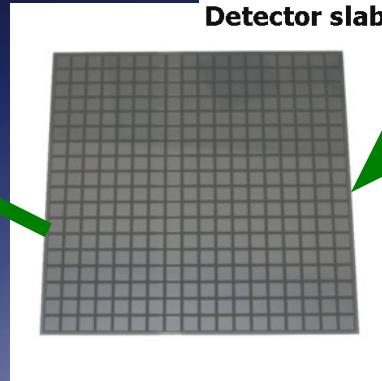
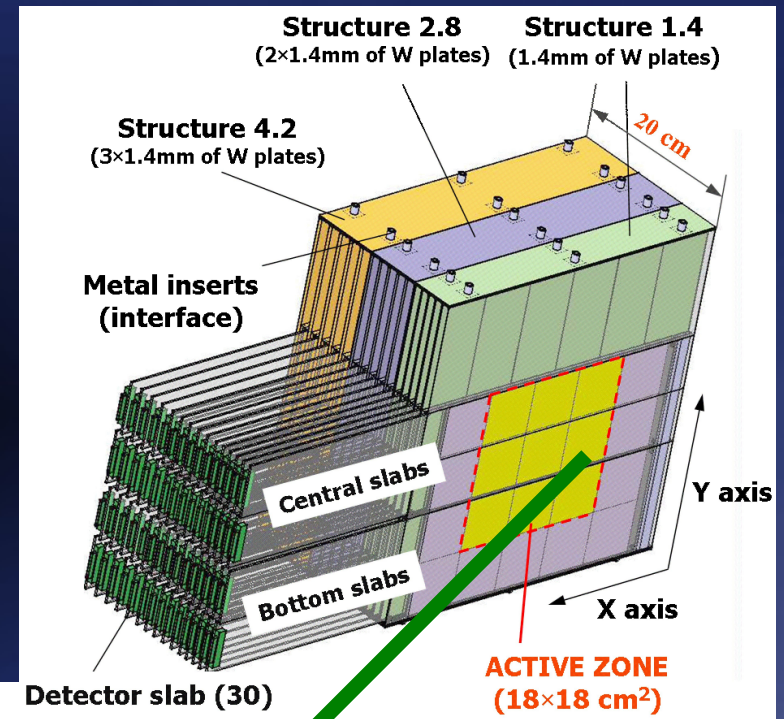
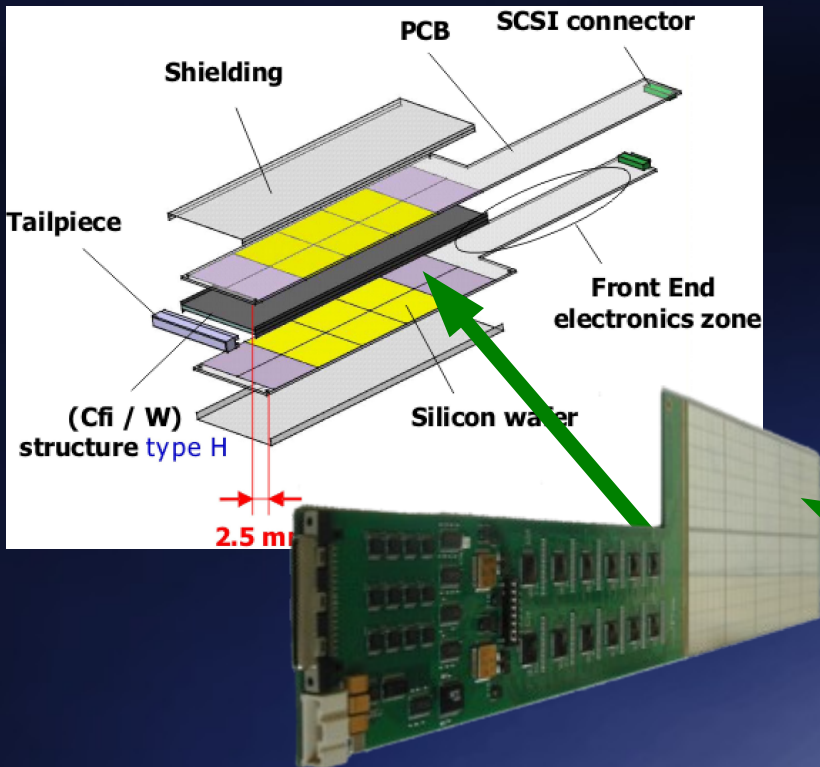
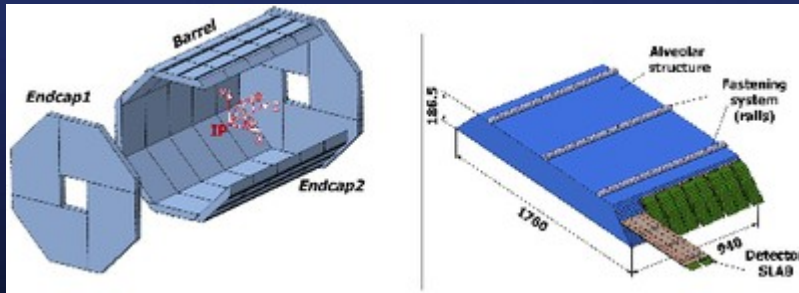
Le laboratoire est impliqué dans le collage des capteurs sur le circuit imprimé



Mais les circuits imprimés, creusés pour incorporer les puces, sont loin d'être plats

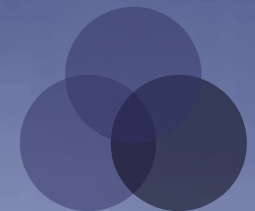


Images du détecteur



Capteur Si

À suivre ...



Les ratés

ISABELLE (Intersting Storage Accelerator + Belle)

Anneau de stockage et collisionneur proton-proton qui devait être opérationnel au Laboratoire national de Brookhaven (BNL). Les travaux ont commencé en 1978 mais en 1981 les aimants supraconducteurs ne se sont pas montrés aussi puissants qu'il aurait fallu. C'est le retard de la mise au point de ces aimants à supraconducteurs qui ont amené la faillite du projet¹⁴. La découverte en 1983 des bosons W et Z⁰ au CERN a diminué ensuite l'attrait du projet ISABELLE (en). Le projet est abandonné en juillet 1983 par le département de l'Énergie.

Le Super Collisionneur Supraconducteur SSC

D'une circonférence de 87 kilomètres sur une aire de Waxahachie au Texas ce collisionneur de hadrons, surnommé Desertron, devait transporter des faisceaux de 20 TeV pour contribuer à la mise en évidence du Boson de Higgs. La construction a commencé en 1991 et 23,5 kilomètres de tunnel étaient creusés fin 1993. Le Congrès américain décida d'abandonner le projet en 1993 en raison du coût prohibitif de la réalisation et peut-être de l'effondrement de l'Union soviétique. Le site est actuellement inoccupé.

Résultats des puces du labo

• SiTR-180_4

- Gain → 8 mv/MIP
- Gamme dynamique → 50 MIP
- Alim → 70 μ W / voie
- Bruit → 325 + 10,1 e^- / pF

• SiTR-130_4

- Gain → 30 mv/MIP
- Gamme dynamique → 30 MIP
- Alim → 290 μ W / voie
- Bruit → 625 + 9 e^- / pF

• SiTR-130_88

- Gamme dynamique → 24 MIP
- Alim → 1,3 mW / voie



Pourquoi CALICE

- Précision
- Épaisseur
- Donc dissipe peu de chaleur (pas de refroidissement)
- Grande granularité
- L'épaisseur totale de l'ECAL sera d'environ 23 longueurs de radiation (correspondant à 18cm). Environ 30 couches de silicium seront utilisées, donnant une résolution en énergie d'environ $0,16/\sqrt{E}$.
- Dans le détecteur final, l'ECAL sera composé d'environ 2400m² de capteurs en silicium, et aura une masse totale d'environ 100 T (principalement en tungstène). Il aura une section en "tonneau" (un tube octogonal avec un rayon intérieur de ~1,8 m et une épaisseur de ~ 20cm), fermé par deux embouts octogonaux. L'ECAL sera accroché à la face avant du calorimètre hadronique (HCAL). La région entre l'ECAL et le point d'interaction sera instrumenté par des trajectomètres.



Tableau périodique des éléments

Tableau périodique des éléments

Groupe → 1 2 13 14 15 16 17 18
 Période ↓ H He VB VB VB VB VB VB VB
 ↓

← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
 ← numéro atomique
 ← symbole chimique
 ← masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]

1	hydrogène 1 H 1,00794																	hélium 2 He 4,002602
2	lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182											boré 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	néon 10 Ne 20,1797
3	sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050											aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,066	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948
4	potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80
5	rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,90550	palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29
6	césium 55 Cs 132,9054519	barium 56 Ba 137,327	lanthanides 57-71	hafnium 72 Hf 178,49	tantalum 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	rhénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 194,217	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [209,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]
7	francium 87 Fr [223,0187]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89-103	rutherfordium 104 Rf [261,1125]	dubnium 105 Db [262,1144]	seaborgium 106 Sg [266,1219]	bohrium 107 Bh [264,1247]	hassium 108 Hs [269,1341]	meitnerium 109 Mt [268,1389]	darmstadtium 110 Ds [272,1463]	roentgenium 111 Rg [272,1535]	copernicium 112 Cn [277]	ununtrium 113 Uut [284]	ununquadium 114 Uuq [289]	ununpentium 115 Uup [288]	ununhexium 116 Uuh [292]	ununseptium 117 Uus [292]	ununoctium 118 Uuo [294]
			lanthane 57 La 138,90547	cérium 58 Ce 140,116	praseodyme 59 Pr 140,90765	néodyme 60 Nd 144,242	prométhium 61 Pm [144,9127]	samarium 62 Sm 150,36	europium 63 Eu 151,964	gadolinium 64 Gd 157,25	terbium 65 Tb 158,92535	dysprosium 66 Dy 162,500	holmium 67 Ho 164,93032	erbium 68 Er 167,259	thulium 69 Tm 168,93421	ytterbium 70 Yb 173,04	lutécium 71 Lu 174,967	
			actinium 89 Ac [227,0277]	thorium 90 Th 232,03806	protactinium 91 Pa 231,03688	uranium 92 U 238,02891	neptunium 93 Np [237,0482]	plutonium 94 Pu [244,0642]	américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0796]	einsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	mendelevium 101 Md [258,1088]	nobelium 102 No [259,1011]	lawrencium 103 Lr [262,1110]	

métaux alcalins alcalino-terreux lanthanides actinides métaux de transition métaux pauvres métalloïdes non-métaux halogènes gaz nobles primordial désintégration d'autres éléments synthétique